Liebe Leserinnen, liebe Leser!



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Man reibt sich die Augen. Da bekennen doch etwa Münchener Genforscher, dass Forschung an Stammzellen aus menschlichen Embryonen für sie „in den kommenden fünf Jahren nicht aktuell“ sein werde. Berliner Forscher sehen das Gebiet höchstens „am frühesten Anfang einer Grundlagenforschung“; andere reagieren längst „allergisch auf den Hype“.

Offenbar weiß die Nation vor lauter biopolitischer und bioethischer Aufgeregtheit nicht mehr ganz, worum es geht: Was machen mit diesen Stammzellen? Präimplantationsdiagnostik (PID) – ja oder nein? Prügel bezog Ministerpräsident Wolfgang Clement. Ende Mai wollte er solche Stammzellen aus Israel importieren, was nach geltendem Embryonenschutzgesetz nicht verboten ist. Für Kritiker schien er jedoch getrieben von „verrückten Forschern, die rücksichtslos ihre Karriere verfolgten“, in einer Art „Kannibalismus“, wie Kardinal Meisner befand.

Könnte es sein, dass die Stammzellen-Debatte nicht nur falsch und allzu verkürzt läuft, sondern auch zu früh? Noch während die Genforscher ihre Grundfragen klären, könnte sich jetzt – erdrückt von einer Frankenstein-Hysterie – ein Moratorium oder Forschungsverbot durchsetzen. Wiederholt sich da die Negativerfahrung mit dem Gentechnikgesetz von 1990? Damals hatten die Apokalyptiker gesiegt. Die schlichte Folge: Firmen verlegten ihre Forschungsstandorte ins Ausland, Wissenschaftler suchten ihre Projekte in den USA. Kein Wunder, dass bald Ernüchterung einsetzte und schon 1993 ein Änderungsgesetz folgte. Die Regelungen seien, so hieß es plötzlich, im Vergleich zu den wirklichen Risiken überzogen gewesen. Verfahren wurden gestrafft und bürokratische Hemmnisse beseitigt.

Nun scheint man demonstrieren zu wollen, dass aus Erfahrung nichts gelernt werden muss. Die bioethische Moral wird inzwischen von jenen gepachtet, die sich für Verbote oder ein Moratorium einsetzen – fern sozialer Realitäten. Das bedeutet abermals bremsen, bevor der Zug anfährt. Das bedeutet auch, den Wissenschaftlern abermals einen Exodus nahe zu legen, etwa in Schurkenstaaten wie die USA, Frankreich, England oder Österreich – noch bevor überhaupt klar ist, warum. Hier könnte daran erinnert werden, worauf kürzlich der Heidelberger Jurist Rüdiger Wolfrum hinwies. Gegen ein Moratorium oder Verbot stellt er das „verfassungsrechtliche Gebot“, wonach „Kontroll- und Überwachungsmöglichkeiten auszuschöpfen“ seien, „bevor eine ganze Forschungsrichtung untersagt wird“.

Eine definitive Verständigung in der Ethikdebatte ist unwahrscheinlich, eine konsequente Verbotshaltung wird gegen eine Mehrheitsmeinung nicht durchsetzbar sein. Nationale Alleingänge in Ethik und Gesetz werden nur kurzfristig überleben können. Wollen wir beispielsweise einen PID-Tourismus in Nachbarländer ähnlich wie Jahrzehnte lang bei der Abtreibung? Sicherlich: Der Erfolg von Forschung ist nicht garantierbar – das gilt auch hier. Aber sollten einmal im Ausland erfolgreich Medikamente oder Therapien an human-embryonalen Stammzellen entwickelt worden sein: Wer würde ihren Import aufhalten wollen?

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

INHALT

TITELBILD:

Die Mumie von Ramses II. und die Totenmaske Tut-ench-Amuns sind eindrucksvolle Zeugnisse des altägyptischen Totenkults.

Mumie: Hulton-Getty, Maske: Mauritius – Mattes



TITELTHEMA:

Das Geheimnis der Mumien

Seite 34

Von Jacques Connan, André Macke und Christiane Macke-Ribet

Nach mehr als zwei Jahrtausenden geben geo- und petrochemische Analysemethoden erstmals detailliert Aufschluss über die Techniken und Substanzen, mit denen im alten Ägypten Leichname konserviert wurden.

ASTROPHYSIK

Methusalem-Sterne

Seite 26

und die Lösung der Alterskrise in der Kosmologie

Von Brian C. Chaboyer

Vor wenigen Jahren noch schienen manche Sterne älter zu sein als das Universum. Korrekturen in der Kosmologie, aber auch modifizierte Sternmodelle und neue Daten haben die Krise entschärft.





INTERNET

Mein Computer versteht mich

Seite 42

Von Tim Berners-Lee, James Hendler und Ora Lassila

Was wäre, wenn der Computer den Inhalt einer Seite aus dem World Wide Web nicht nur anzeigen, sondern auch seine Bedeutung erfassen würde? Er könnte ungeahnte Dinge für seinen Benutzer tun – und das vielleicht schon bald, wenn das semantische Netz etabliert ist.











WERNER SELG / CHIWA, USBEKISTAN

Al-Biruni, ein in Westasien bekannter und angesehener Gelehrter

Al-Biruni – ein Gelehrter, den das Abendland übersah

Mai 2001

Sehr beachtenswert finde ich es, dass ein Bericht über den Gelehrten Al-Biruni (häufig auch Al-Buruni geschrieben) Aufnahme in „Spektrum der Wissenschaft" gefunden hat. Wer in entsprechende Länder Westasiens reist, begegnet ihm immer wieder.

Als ich 1995 in Chiwa in Usbekistan das „Museum für Geschichte der Medizin des alten Choresm" besuchte, war dort auch ein Bild eines Gelehrten ausgestellt, das Al-Biruni darstellen soll. Ein Foto davon ist hier abgebildet. (Beeindruckende Bilder der Geburtsstadt Al-Birunis finden sich unter: www.uni-leipzig.de/~indzaw/zaw/bilder/usbekistan/chiwa/)

Werner Selg, Sigmaringendorf

Die Zukunft des Wissens

Rezensionen – Mai 2001

„Die Philosophie säße doch in keinem Elfenbeinturm (mehr)." So schreibt der Autor der Buchkritik und nimmt dieses Buch wie den Kongress auch als Indiz.

Sicher, wer als Interessierter die überwiegend weite Anreise nach Konstanz nicht scheute, auch nicht vor den immensen Unterbringungs- und Verpflegungskosten zurückschreckte, die Anmeldegebühr von 100 DM bezahlen konnte, dem stand dieser Kongress offen. So gut wie kein Medium berichtete darüber.

Aber auch für die anderen erschließt sich die Offenheit der Philosophie, denn sie können den Kongressbericht nun für nur 198 DM erwerben – was jeder gerne mal für solche Information bezahlt. Zumindest die Eintrittsgebühren für den Turm der Philosophen scheinen noch darauf hinzuweisen, dass er aus Elfenbein geschnitzt ist.

Arno Rauzenberg, Düsseldorf

Leserbrief zu „100 Jahre Quantentheorie"

Juli 2001

Der Brief von Hern Wagner beruht auf einem offensichtlichen Fehler: Da das Erreichen des „Totpunktes" unendlich lange dauert, würde es auch unendlich lange brauchen, bis dieser sich aus einer Anfangsposition der Ruhe in Bewegung setzen könnte. Das ist aber eigentlich irrelevant, denn man könnte den Anfangszustand in einer kleinen Potentialmulde stabilisieren und dann auf Tunneln verweisen.

Prof. H. Dieter Zeh, Waldhilsbach

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716

Etüde für Chip und Schallfeld-Kontrolle

Technoskop – Mai 2001

Das auf der Seite 85 abgebildete Piano ist moderner, als es der Zeichner wohl beabsichtigt hatte: Die Klaviatur hat eine durchgehende Reihe schwarzer Tasten ohne die sonst übliche Unterbrechung zwischen e und f beziehungsweise h und c (2:3-Anordnung).

An sich ist die Idee einer durchgehenden schwarzen Tastenreihe gar nicht so schlecht, würde sie doch die Gesamtbreite der Klaviatur eines Flügels mit 88 Tasten von 123 cm auf ca. 105 cm reduzieren.

Der größere Vorteil läge jedoch in den technischen Spielmöglichkeiten: Man würde in allen Tonarten gleichermaßen mit weißen und schwarzen Tasten spielen und weite Griffe leichter realisieren können, denn die Oktave wäre um eine Taste kleiner. Allerdings fiele die Orientierung wesentlich schwerer, sodass beispielsweise Tasten im Oktavabstand eingefärbt werden müssten.

Prof. Hans Ueckert, Hamburg

Weitere Experimente mit der Lichtmühle

Physikalische Unterhaltungen – Februar 2001

Bei meiner Lichtmühle kann ich Rückdrehungen über mehrere Minuten (4 bis 5 Minuten bis zum völligen Stillstand) erzielen, wenn ich sie – zum Beispiel mit einem Föhn – erhitze und die Wärmequelle entferne, sobald die Mühle (nach Beschattung) zum Stillstand gekommen ist.

WOLFGANG BÜRGER

Zum Effekt des Lichtdrucks sind Versuche mit einem Laser instruktiv. Man bestrahlt gezielt nur die eine oder die andere Seite und erkennt, dass die Drehung nicht durch Lichtdruck hervorgerufen wird. Denn dann müsste das Bestrahlen der blanken Fläche einen mindestens ebenso deutlichen Effekt haben wie das Bestrahlen der dunklen Fläche, was aber offensichtlich nicht der Fall ist.

Dr. Stefan Böhm, per e-mail

Holz, sauer eingelegt

Technogramm – Mai 2001

Das angegebene Reagens ist Essigsäureanhydrid (Anhydrit ist ein Mineral). Es reagiert mit Hydroxylgruppen statt zu Acetyl- zu Acetoxygruppen (-O-CO-CH_3).

Prof. Alfred Schmidpeter, München

Antwort der Redaktion

Die Anmerkung des Lesers ist richtig. Doch wird in der Holzwirtschaft der Sauerstoff der ursprünglichen Hydroxylgruppe nicht als Teil der funktionellen Gruppe betrachtet und in Fachveröffentlichungen daher die im Grunde regelwidrige Bezeichnung Acetylgruppe verwendet.

Die Indianer von La Florida – Mai 2001

Die Legende zum Knochendünnschliff (Seite 71 oben rechts: „Anämie und poröse Hyperostose") ist nicht korrekt. Es handelt sich hier um die mikroskopische Betrachtung eines ungefärbten Knochendünnschliffs im polarisierten Licht unter Benutzung eines Kompensators (Quarzplättchen; daher die „Färbung"). „Siebartige Schäden" gibt es nicht an der „Schädeldecke", sondern an den Augenhöhlendächern. Die in der Legende beschriebenen „dunklen Bänder" treten nicht bei gesunden Personen auf, sie sind ausschließlich krankhaften Ursprungs.

Dr. T. Schmidt, Bovenden

Berechenbare Panik

Forschung aktuell – Mai 2001

Herrn Weinreich gebührt besonderer Dank für seine sehr klaren Ausführungen zu den Möglichkeiten moderner computergestützter Simulationsverfahren im Bereich der Personensicherheit.

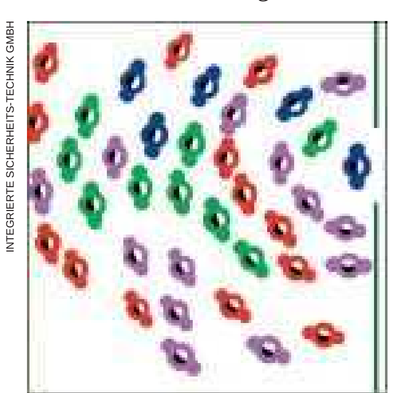
Ergänzen möchte ich, dass im Umfeld des vorbeugenden baulichen Brandschutzes die Entwicklung von Computermodellen zur verhaltensorientierten Simulation der individuellen Bewegung von Personen in Gefahrensituationen eine lange Tradition hat und diese mittlerweile ihren Weg in die Anwendungspraxis gefunden haben.

Die fortschrittlichsten Verfahren berücksichtigen dabei die in dem Beitrag angesprochenen sowie weitere externe Einflussfaktoren und entsprechende individuelle Reaktionsmuster, teilweise sogar in Kombination mit strömungsdynamischen Methoden zur Berechnung der Brandentwicklung und Rauchausbreitung.

Die in dem Beitrag aufgezeigte Perspektive, solche verhaltensorientierten Computersimulationen zur Entwicklung und Optimierung von Sicherheitskonzepten in Hochhäusern oder Fußballstadien zu nutzen, ist also bereits Realität. So wurde beispielsweise das von der Frankfurter Firma I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik entwickelte Evakuierungsprogramm ASERI bei der Erstellung des Sicherheitskonzeptes für den Fernbahnhof Frankfurt Flughafen und der neuen „Arena auf Schalke“ in Gelsenkirchen eingesetzt.

Besonders hervorzuheben ist die Einschätzung von Herrn Weinreich bezüglich der Möglichkeiten, die eine Rückkopplung von simulationsgestützter Prognose und tatsächlichem Verhalten der betroffenen Personen bietet. Jüngste Vorkommnisse und Katastrophen – es sei nur an den Brand im Flughafen Düsseldorf erinnert – zeigen die große Bedeutung einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik unter Ausnutzung der Möglichkeiten, welche bewährte Methoden moderner Computersimulation bieten.

Dr. Volker Schneider, Frankfurt



INTEGRIERTE SICHERHEITS-TECHNIK GMBH

Beginnende Bogenbildung an einem schmalen Ausgang. Die unterschiedliche Mobilität ist farblich abgestuft.

Die verbeulte Erde – Mai 2001

Im sonst recht interessanten und farbigen Beitrag sagt Michael Gurnis unter „Kontinente als Fahrstuhl“, dass die meisten Geologen eine Vertikalbewegung der Kontinente bezweifeln. Das ist eine überraschende Feststellung, denn bis in die 30er Jahre des vergangenen Jahrhunderts war die Vertikalbewegung der Kontinente die einzige (erlaubte) Definition einer Kontinentalbewegung in der Geologie. Selbst der Altvater der Geologen Suess hat sich in seinem Werk über die Entstehung der Alpen (1870) nicht offen gegen diese etablierte Meinung gestellt. Der Amateur v. Löffelholz scheiterte mit seiner These der horizontalen Kontinentalbewegung (~ 1888/90) ebenso wie Alfred Wegener (1912) am Widerstand der geologischen Fachwelt. Sollte das alles schon vergessen sein?

SLIM FILMS

Hans-Jürgen Bobzien, Tornesch

Erratum
Die bewegte Geschichte des Nordatlantiks – Juni 2001

Im Kasten auf Seite 54 sind bei den ersten beiden Skizzen die Beschriftungen „vor 100 Millionen Jahren“ und „vor 120 Millionen Jahren“ vertauscht worden.

Red.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 504-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ulf Borgeest, Walter Braun, Andrea Jungbauer, Gabriele Meier, Dr. Susanne Lipps, Peter Schütz, Matthias Weiß.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,90/sfr 12,90/öS 98,–; im Abonnement DM 142,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 123,60. Die Preise beinhalten DM 10,80 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 10,20 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (06221) 504-748, Fax -758; verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard, Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Michael Albrecht, Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von GLOBO Ringier Publ. GmbH, München. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

THEORETISCHE PHYSIK

All ohne Urknall – das ekpyrotische Universum

Nach einem neuen Modell entstand unser Kosmos nicht durch den berühmten, aber physikalisch fragwürdigen Urknall, sondern bei der Kollision zweier Vorgänger-Welten in einem zehndimensionalen Raum.

Von Markus Pössel

Das Weltall dehnt sich unablässig aus. Verfolgt man seine Entwicklung im Zeitraffer zurück, schnurrt es daher gleichsam zusammen: Es wird immer dichter, während die verschiedenen Raumregionen einander näher und näher rücken. Schließlich gelangt man bei dieser gedanklichen Kompression unweigerlich in Bereiche, in denen Quanteneffekte auftreten müssten.

So erfolgreich die bekannten Urknallmodelle der Kosmologen die spätere Evolution des Universums beschreiben, stoßen sie hier an die Grenzen ihrer Gültigkeit – noch bevor die Reise in die Vergangenheit beim Big Bang angelangt ist, jenem unphysikalisch-abrupten Beginn des Universums, dem die Modelle ihren Namen verdanken. Eine Beschreibung dieser frühen Phase unserer Welt müsste die Gravitation und Quanteneffekte gleichermaßen einschließen. Wie eine solche Theorie der Quantengravitation aussieht, steht zur Zeit noch in den Sternen – weltweit suchen theoretische Physiker fieberhaft danach.

Inflation als Notbehelf

Ein weiterer Mangel der Urknallmodelle ist, dass sie eine Reihe von Eigenschaften unserer Welt nicht recht erklären können. Warum ist der Raum flach, wie wir es aus dem Alltag gewohnt sind, obwohl er nach den Urknallmodellen auch mehr oder weniger stark gekrümmt sein könnte? Warum war das frühe Universum äußerst gleichförmig, obwohl einige Teilregionen gar keine Gelegenheit gehabt haben sollten, sich zu durchmischen? Wie kam es andererseits zu den charakteristischen kleinen Inhomogenitäten, aus denen letztendlich Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen entstanden sind? Warum sehen wir keine exotischen Elementarteilchen – etwa magnetische Monopole –, wie sie unter den extrem energiereichen Bedingungen hätten entstehen müssen, die im frühen Universum geherrscht haben sollen?

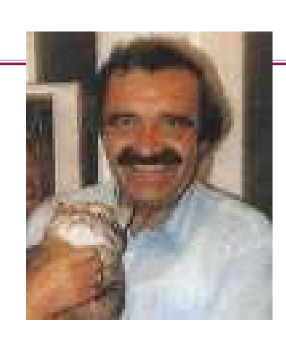
Offenbar erzählen die Urknallmodelle nicht die ganze Geschichte, und der von ihnen beschriebenen Expansionsphase, in die der Kosmos vor 12 bis 16 Milliarden Jahren eintrat, ging eine andersartige Entwicklung voraus. Nach dem derzeit verbreitetsten Modell war dies eine Inflationsphase, in der sich das All rasant aufblähte und die einzelnen Raumgebiete mit exponentiell wachsender Geschwindigkeit auseinander strebten. Unter dieser Annahme lassen sich für die genannten Besonderheiten unserer Welt recht natürliche Erklärungen finden.

Kürzlich hat jedoch eine Gruppe von Physikern – Paul Steinhardt von der Universität Princeton, sein Doktorand Justin Khoury, Burt Ovrut von der Universität von Pennsylvania in Philadelphia und Neil Turok von der Universität Cambridge – ein Alternativmodell vorgeschlagen: das „ekpyrotische Universum“. So antik sein Name, der auf Vorstellungen der altgriechischen Stoiker von einer feurigen Regeneration des Alls zurückgeht, so modern ist das Konzept selbst – leitet es sich doch vom Neuesten ab, was die professionellen Welterklärer zu bieten haben: den Stringtheorien.

Diese sind nach Meinung vieler theoretischer Physiker die bislang besten Aspiranten auf eine Theorie der Quantengravitation. Ihre Besonderheit: Sie sehen in den bekannten Elementarteilchen nicht gesonderte Partikel, sondern nur unterschiedliche Schwingungszustände ein und derselben Sorte winziger, eindimensionaler Fädchen oder Saiten, englisch *strings*.

Allerdings lassen sich die Stringtheorien bisher nur in neun Raumdimensionen widerspruchsfrei formulieren. Um die drei Dimensionen unserer Alltagswelt zu erklären, muss man postulieren, dass die restlichen sechs winzig klein zu-

SPEKTRUM-INTERVIEW



Prof. Dr. Gerhard Börner, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching bei München

***Spektrum:** Was ist das Neue am ekpyrotischen Universum?*

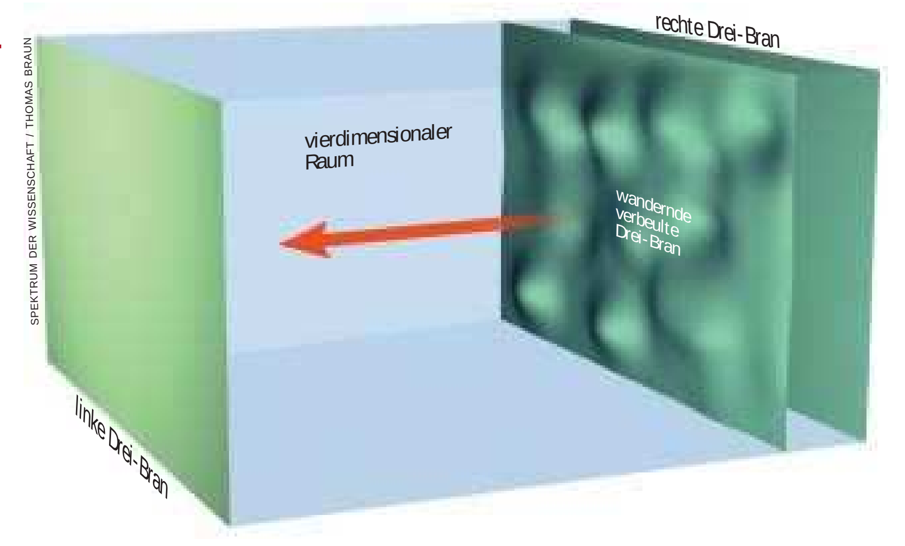
Prof. Gerhard Börner: Das Neue ist der Versuch, das Urknallmodell mit einer fundamentalen Theorie, der so genannten Stringtheorie, in Verbindung zu bringen. Wie in dem nebenstehenden Artikel ausgeführt wird, soll dem klassischen Urknall eine Konfiguration von Objekten der Stringtheorie vorhergehen, deren Dynamik zu einem physikalisch bestimmten Anfangszustand des Kosmos führt (‚when branes collide ...‘). Da diese Theorie den hohen Anspruch hat, die grundlegende „Theorie von Allem“ zu sein, muss sie selbstverständlich auch den Urknall erklären. Ich finde solche Versuche ganz legitim, wenn sie deutlich als Spekulation gekennzeichnet sind und nicht in Presse-Verlautbarungen als gesicherte wissenschaftliche Erkenntnis angepriesen werden. Die Frage ‚Was war vor dem Urknall?‘ kann sich der aufmerksame Leser nun auch von der Stringtheorie, nicht nur von Augustinus beantworten lassen.

***Spektrum:** Das ist ja sehr erfreulich.*

Börner: Na ja, es ist kein reines Vergnügen, das 63 Seiten lange Papier des ekpyrotischen Universums durchzuackern, und man kann natürlich weiter fragen: ‚Woher kommt eigentlich diese Anfangskonfiguration der Stringtheorie‘?

***Spektrum:** Standardmodell mit Inflation – das schien doch der neue Kanon zu sein. Warum hat sich die Inflation nicht durchgesetzt?*

Börner: Interessanterweise hat sich ja das inflationäre Modell wie eine kanonische Ergänzung des Standardmodells etabliert. Wohl auch ein Effekt der nimmermüden Propaganda. Tatsächlich aber lässt die physikalische Unterfütterung der Inflationsmodelle einiges zu wün-



Das ekpyrotische Modell geht von zehn Raumdimensionen aus, von denen aber sechs aufgerollt sind. Eine weitere Dimension hat eine sehr geringe endliche Ausdehnung. Ihre beiden dreidimensionalen Ränder, so genannte Drei-Branen, waren ursprünglich völlig homogen. Dicht bei der einen bildete sich auf Grund von Quantenfluktuationen eine weitere Drei-Bran mit leichten Ausbeulungen. Sie wurde von der anderen Rand-Bran angezogen, sodass sie sich auf diese zu bewegte und schließlich mit ihr kollidierte. Dabei entstand ein mit heißer Materie gefülltes Rand-Universum, das aus Sicht eines darin lebenden Beobachters so expandiert, als sei es aus einem klassischen Urknall hervorgegangen.

sammengerollt sind und unseren Blicken daher verborgen bleiben – ähnlich wie uns die zweidimensionale Fläche eines dünnen Trinkhalms aus der Entfernung eindimensional erscheint. Die zusammengerollten Dimensionen beeinflussen dabei die Schwingungszustände der Strings und erweisen sich sogar als notwendig, um die Vielfalt der experimentell nachgewiesenen Elementarteilchen halbwegs reproduzieren zu können.

Steinhardt und seine Kollegen gehen bei ihrem kosmologischen Modell von einer Erweiterung der Stringtheorie aus, die sogar zehn Raumdimensionen hat und den klangvollen Namen heterotische M-Theorie trägt. Dort sind sechs der zehn Raumdimensionen winzig klein zusammengerollt – mit Radien in der Größenordnung von 10^{-33} Metern.

Welten im Zusammenstoß

Eine weitere Dimension ist dagegen nicht in sich aufgewickelt, sondern ähnelt einem Strich mit einer Länge von 10^{-33} bis 10^{-29} Metern, der durch zwei Raumpunkte begrenzt wird. Im vierdimensionalen Raum, der nach Abzug der sechs aufgerollten Dimensionen übrig bleibt, entsprechen diese Randpunkte dreidimensionalen Gebilden. Sie heißen im Jargon der Physiker „Drei-Branen" – in Analogie zu den zweidimensionalen Membranen unserer Alltagswelt.

Unser sichtbares Universum wäre eine solche Drei-Bran, und sowohl die Materieteilchen, die wir kennen, als auch drei der vier Grundkräfte könnten sich lediglich auf dieser Drei-Bran ausbreiten. Einzig die Gravitation wäre im Stande, den leeren Raum zwischen den beiden Rändern zu überbrücken und uns das Vorhandensein des gegenüberliegenden zweiten Randes anzuzeigen.

Das ekpyrotische Modell geht davon aus, dass sich diese höherdimensionale Welt ursprünglich in einem strukturlosen Grundzustand minimaler Energie befand, in dem es keine Materie der uns bekannten Art gab. Doch die für die Quantenwelt typischen Fluktuationen machen es möglich, dass sich auch aus solch einem einfachen Gebilde kompliziertere Strukturen ergeben können. Einige der denkbaren Entwicklungen führen tatsächlich zu einem Universum, das nach Art der Urknallmodelle expandiert.

Wie sehen sie aus? In einem der von Steinhardt und Kollegen diskutierten Szenarien bildet sich nahe am einen Rand eine weitere, dritte Drei-Bran. Sie ist parallel zu den beiden anderen ausgerichtet, aber im Unterschied zu diesen nicht völlig glatt; vielmehr weist sie auf Grund von Quanteneffekten kleine Fluktuationen und Beulen auf. Ihre Entstehung ist zur Zeit nicht exakt berechenbar, dürfte aber qualitativ der Bildung von Blasen in kochendem Wasser ähneln, die hie und da aus winzigen Bläschen hervorgehen. Auch die Dynamik des resultierenden Systems lässt sich bisher nicht exakt beschreiben, doch kann man Plausibilitätsargumente dafür finden, dass die neue Bran von der ihr ferneren Rand-Bran angezogen wird und deshalb beginnt, sich langsam zu ihr hin zu bewegen. ▶

schen übrig. Die Modelle eines Skalarfeldes mit Potenzial sind ja nicht wirklich mit teilchenphysikalischen Modellen verknüpft, sondern ad hoc postuliert; das chaotische Modell macht Aussagen über hochenergetische Prozesse, deren Energien bei der so genannten Planck-Energie liegen, wobei wohl jeder überzeugt ist, dass dies ohne eine fundamentale Theorie wenig Aussagekraft hat. Deshalb ist es erfreulich, dass einmal ein anderes, ebenfalls spekulatives Modell als Alternative formuliert wird. Die robusten, modellunabhängigen Vorhersagen des Inflationskonzepts – Dichte gleich der kritischen, bestimmtes Spektrum von Dichtefluktuationen –, die muss natürlich das ekpyrotische Universum auch liefern.

Spektrum: *Behebt die neue Theorie die Schwächen des Standardmodells?*

Börner: Ihre Schöpfer erheben diesen Anspruch – eine Kritik der neuen Theorie ist von Anhängern der Inflationstheorie verfasst worden (‚Das pyrotechnische Universum'). Inzwischen gibt es darauf eine Erwiderung, und damit beginnt der dornige Pfad zu wirklichen Erkenntnissen, die ja nie auf einen Schlag, sondern immer über eine mühsame Folge von Versuch und Irrtum zu Stande kommen. Bei den Kosmologen gilt dies, wie der russische Physiker Yakow Zeldowitsch einmal bemerkte, in besonderer Strenge: Sie irren oft, aber zweifeln nie.

Spektrum: *Na dann! Was sind die Stärken und Schwächen des neuen Modells?*

Börner: Einer Einschätzung der wissenschaftlichen Bedeutung dieses Ansatzes sollte wohl auch eine kritische Würdigung der Stringtheorie zu Grunde gelegt werden. Selbst wenn man diese Theorie akzeptiert, scheint nach den bisherigen Diskussionen das ekpyrotische Modell genau abgestimmte Anfangsbedingungen zu brauchen.

Spektrum: *Lässt sich zwischen beiden Modellen durch Beobachtungen unterscheiden?*

Börner: Es gibt eine interessante Möglichkeit. Unterschiede könnten, wie im Artikel von Markus Pössel erwähnt, in der Polarisation des kosmischen Mikrowellenhintergrundes auftreten. Weitere Unterschiede ergeben sich wohl für einen kosmischen Hintergrund von Gravitationswellen, dessen Messung aber noch Zukunftsmusik ist.

Nach einiger Zeit kollidiert sie mit der Rand-Bran und verschmilzt mit ihr. Schon bei ihrer Annäherung wird auf der Rand-Bran ein Prozess in Gang gesetzt, der einem hypothetischen Beobachter dort wie die Expansionsbewegung eines Urknallmodells erschiene. Bei der Kollision selbst entstehen aus der Bewegungsenergie der driftenden Bran dann hochenergetische Teilchen, die das Randuniversum bevölkern. Das Ergebnis ist ein mit heißer Materie gefüllter Kosmos, der sich so ausdehnt, als wäre er aus einem Urknall hervorgegangen – allerdings ohne dass er die problematischen frühen Phasen der Urknallmodelle wirklich durchlaufen hätte.

Bei alldem verspricht das ekpyrotische Modell auch Lösungen für die eingangs genannten kosmologischen Probleme. Die Homogenität von Materie und Strahlung ergibt sich ebenso wie die flache Geometrie des Raums direkt aus den niederenergetischen Zuständen der kollidierenden Branen. Die problematischen exotischen Teilchen würden bei den für das Modell vorgeschlagenen Energien gar nicht erst erzeugt. Die Quantenfluktuationen der mittleren, bewegten Bran erklären das Vorkommen und die Eigenschaften der winzigen Inhomogenitäten im frühen Universum.

Im Gegensatz zum Inflationsmodell würde keine vollständig ausgearbeitete Theorie der Quantengravitation benötigt, um den Ursprung des Kosmos zu beschreiben. Die Rahmenwelt, von der unser Universum einen Rand darstellt, war in diesem Modell ja schon immer vorhan-

Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil XI)



Anlässlich der Entzifferung des menschlichen Erbguts stellen wir beispielhaft zwölf darin codierte Proteine vor.

Myosin

Molekularer Muskelmotor



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß ist Biochemiker in Oxford (England)

Unter einem Motor stellt man sich meist eine Maschine vor, die irgendwelche Räder zum Rotieren bringt. Doch eine Drehbewegung ist nicht unbedingt erforderlich und macht die Sache nur unnötig kompliziert. Die einfachsten Motoren setzen die zugeführte Energie direkt in eine geradlinige Bewegung um. Bestes Beispiel: das Düsentriebwerk.

Folglich gibt es in der Biologie nur recht wenige Rotationsmotoren (etwa für die Schwimmbewegung begeißelter Bakterien), aber eine Unzahl von linearen Zugmaschinen. Viele davon treiben ausschließlich Transportprozesse in der Zelle an, doch eine von ihnen erzeugt Bewegungen, die wir sehen und fühlen können: das Actin-Myosin-System.

Wie seit rund vierzig Jahren bekannt ist, kommt die Muskelbewegung bei allen Tieren dadurch zu Stande, dass zwei Gruppen von parallel angeordneten molekularen Strängen aneinander entlanggleiten. Die dünnen bestehen hauptsächlich aus dem Protein Actin, das entgegen seinem Namen nur eine passive Rolle spielt. Die dicken Stränge hingegen enthalten das Protein Myosin, das sich unter Verbrauch des Energieträgers ATP an den Actin-Filamenten entlanghangeln kann.

Myosin hat einen etwa 160 Nanometer langen Stiel, der an seinem einen Ende in dem dicken Strick verankert ist. Am anderen Ende befinden sich zwei Köpfe, die den aktiven Teil des Proteins verkörpern. Solange der Kopf kein ATP-Molekül enthält, ist er fest an eines der Actin-Moleküle des dünnen Strangs gebunden. Auch im Reagenzglas bilden die beiden Proteine zusammen einen so genannten Actomyosin-Komplex.

Sobald der Energiestoß in Gestalt von ATP eintrifft, lässt Myosin jedoch das Actin los, und spaltet das ATP-Molekül in ADP und Phosphat. Die Anwesenheit dieser beiden Moleküle in der Bindungstasche bewirkt, dass sich das Protein streckt und dadurch ein anderes Actin-Molekül in größerer Entfernung von seiner Verankerung ergreifen kann. Diese zunächst schwache Bindung veranlasst das Myosin, die Phosphatgruppe abzustoßen. Daraufhin verstärkt sich die Bindung und das Protein schrumpft wieder auf seine anfängliche Länge. Dieser Schritt erzeugt die Kraftübertragung von drei bis vier Piconewton (einige Billionstel der Schwerkraft, die auf einen mittelgroßen Apfel wirkt) und verschiebt die Stränge um etwa fünf Nanometer. In der verkürzten Form stößt das Myosin dann das ADP ab und ist nun bereit, den Zyklus von vorne zu beginnen.

Seit Mitte der neunziger Jahre kann man die Bewegung molekularer Motoren mit „optischen Pinzetten“ und anderen biophysikalischen Werkzeugen direkt untersuchen. Auf diese Weise wurden etwa die genannten Werte für die Kraftübertragung und die Bewegungsstrecke gemessen. Ungefähr zur gleichen Zeit lieferten röntgenografische Untersuchungen Einblicke in den räumlichen Aufbau von Actin und Myosin und damit in die strukturellen Grundlagen ihrer Motorwirkung. Dennoch sind noch nicht alle Einzelheiten geklärt. Einige der Messungen an Einzelmolekülen scheinen anzuzeigen, dass der Verbrauch eines ATP-Moleküls genügend Energie für mehrere Bewegungsschritte liefert. Sollte sich dies bestätigen, müsste der Reaktionszyklus um eine Methode erweitert werden, mittels derer das Myosin einen Teil der Energie des ATPs speichern kann.

Steckbrief

- Molekulargewicht: 527 324
- Aminosäuren: 4610
- 2 schwere und 4 leichte Ketten
- Motorprotein
- Chromosom Nr. 17, Nr. 2, Nr. 4

Myosin enthält am Ende eines „Stiels“ zwei bewegliche „Krallen“, deren jede sich, wie die linke Hälfte der oberen Zeichnung illustriert, aus einer schweren Kette (rosa) und zwei leichten (gelb und hellbraun) zusammensetzt. Mit ihnen kann es sich am Actin-Strang entlanghangeln (untere Zeichnung).

DAVID S. GOODSELL / RCSB

den; und was vor und während der Branenkollision geschah, sollte sich im Prinzip mit den existierenden Formulierungen der Stringtheorie beschreiben lassen.

So gut sich dies alles anhören mag, sind Heureka-Rufe allerdings sicherlich noch verfrüht. Das ekpyrotische Modell ist gerade erst veröffentlicht worden und hat seine Feuerprobe noch vor sich: die Diskussion der Kosmologen und Stringtheoretiker, die sich in den nächsten Monaten im Internet und in den Fachzeitschriften abspielen dürfte. Der erste Gegenartikel ließ keine zwei Wochen auf sich warten; seine Autoren – darunter Andrej Linde, wie Steinhardt einer der Väter der Inflationsmodelle – üben harte Kritik an den vorgeschlagenen Annahmen und Mechanismen und stellen die Vorhersagekraft des ekpyrotischen Modells grundsätzlich in Frage. Zwei Antwortartikel, in denen Steinhardt und Kollegen auf die Einwände eingehen, sind gerade im World Wide Web erschienen.

Nagelprobe mit Gravitationswellen

Die Diskussion wird sich jedenfalls noch eine Weile auf der rein theoretischen Ebene bewegen müssen. Bislang gibt es nämlich nur wenige Beobachtungsdaten, mit deren Hilfe man Modellen für die Entstehung des Universums auf den Zahn fühlen könnte. Während die herkömmliche Expansion gut durch Beobachtungen abgesichert ist, ermöglichen es genaue Messungen der Inhomogenitäten in der kosmischen Hintergrundstrahlung erst seit kurzem, überhaupt konkretere Vorhersagen der Inflationstheorie zu prüfen. Leider sind dies Vorhersagen, in denen Inflation und Ekpyrosis übereinstimmen.

Um anhand von Beobachtungen zwischen den beiden Modellen entscheiden zu können, müsste man die Eigenschaften von Gravitationswellen aus dem frühen Weltall ermitteln. Indirekt könnte dies über die Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung schon recht bald gelingen; ein direkter Nachweis dürfte, wenn überhaupt, allerdings erst mit hochempfindlichen zukünftigen Gravitationswellendetektoren möglich sein. Ob sich das ekpyrotische Modell zum ernsthaften Konkurrenten für die Inflation entwickeln kann, bleibt also abzuwarten. Wer Genaues über den letzten Ursprung unserer Welt wissen möchte, muss sich wohl oder übel noch in Geduld fassen. ■

Markus Pössel *promoviert am Albert-Einstein-Institut in Potsdam im Bereich Quantengravitation und Stringtheorie.*

QUANTENOPTIK

Ein Molekül aus einem Atom und einem Photon

Physikern ist es gelungen, ein Atom und ein Lichtquant zwischen zwei hoch reflektierenden Spiegeln zu verbinden. Ein solches Atom-Photon-Molekül könnte den gezielten Abruf von Informationen in künftigen Quantencomputern ermöglichen.

Von Gerhard Rempe

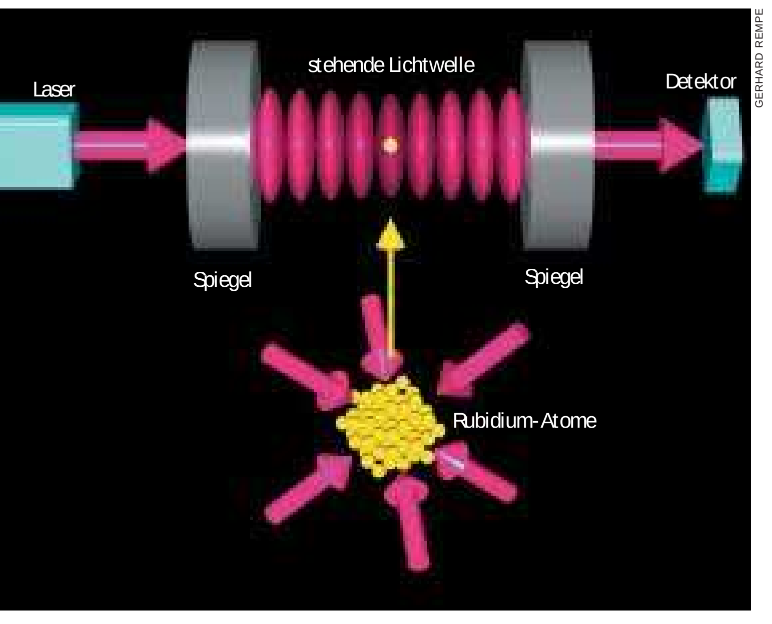
„In einem Akt der Verzweiflung“ führte Max Planck im Jahr 1900 die Quantenhypothese in die Physik ein. Nur damit konnte er die Wärmestrahlung eines Objekts erklären, das einfallende Strahlung vollständig verschluckt und in Wärme umwandelt. Einen solchen „schwarzen Körper“ realisierten die Physiker damals als Hohlzylinder mit einer kleinen Öffnung. Licht, das durch das Loch eintritt, wird im Inneren vollständig absorbiert. Durch die Öffnung zurück nach außen gelangt nur noch Wärmestrahlung, die allein von der Temperatur des Körpers abhängt. Um deren Spektrum berechnen zu können, musste Planck annehmen, dass das Lichtfeld im Hohlkörper Energie nicht in beliebigen Portionen mit den Wänden austauschen kann, sondern nur in diskreten „Quanten“, die wir heute Photonen nennen.

Plancks Annahme war der Beginn einer Revolution in der Physik, aus der die heute gängige Theorie zur Beschreibung der atomaren und subatomaren Welt hervorging. Vor hundert Jahren schien es allerdings völlig unvorstellbar, dass man jemals mit einzelnen Photonen in einem Hohlraum experimentieren könnte. Das ist erst in neuerer Zeit den Laserphysikern gelungen. An die Stelle des mit Wärmestrahlung gefüllten schwarzen Körpers zu Plancks Zeiten ist dabei allerdings sein elegantes modernes Pendant getreten: Das elektromagnetische Vakuum zwischen hoch reflektierenden Spiegeln.

In einem solchen Hohlraum ist nun sogar ein besonderes Kunststück geglückt: Unabhängig voneinander konnten Jeff Kimble am California Institute of Technology in Pasadena (Kalifornien) und meine Forschergruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München mit einzelnen Photonen einzelne Atome festhalten und deren Bewegung zugleich in Echtzeit mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung beobachten.

Die Spiegel mussten dazu extremen Ansprüchen genügen, die erst in jüngster Zeit erfüllbar wurden. Konventionelle Exemplare aus Glas mit einer Deckschicht aus Aluminium oder Silber, wie sie in jedem Badezimmer hängen, haben noch Reflexionsverluste von einigen Prozent. Dagegen kann man heute Spiegel fertigen, deren Verluste gerade noch ein zehntausendstel Prozent betragen. Sie bestehen aus einem extrem glatten Glasträger, auf den im Wechsel bis zu fünfzig hauchdünne transparente Schichten aus Silizium- und Tantaloxid aufgedampft sind.

Fällt Licht auf ein solches System, wird an jeder Schichtgrenze ein Teil zurückgeworfen. Die reflektierten Wellen überlagern sich und verstärken sich gegenseitig, sofern die Dicken und Brechungsindizes der einzelnen Schichten passend gewählt sind. Aus derart hochwertigen Spiegeln lassen sich so genannte optische Resonatoren bauen, in denen das Licht fast eine Million Mal hin und her reflektiert und entsprechend lange gespeichert wird – je nach Abstand zwischen den Spiegeln bis zu einigen tausendstel Sekunden.



Zwischen zwei hoch reflektierenden Spiegeln bildet ein Photon, das von einem schwachen Laser stammt, eine stehende Welle. Rubidium-Atome werden mit sechs Laserstrahlen stark abgebremst und behutsam in die Höhe geworfen. Dadurch gelangt ein einzelnes Atom zwischen die Spiegel und bildet mit dem Photon ein Paar, dessen Position dem austretenden Licht zu entnehmen ist.

Gefangen in der optischen Falle

Ein Atom, das in einen solchen Resonator gebracht wird, ändert seine Strahlungseigenschaften grundlegend. Ohne diese High-Tech-Umgebung fiele es von einem angeregten Zustand in kürzester Zeit – gewöhnlich nach etwa zehn Millionstel Millisekunden – in den Grundzustand zurück. Im Verlauf dieses Vorgangs würde es ein Photon aussenden. Lange galt der rasante Zerfall des angeregten Zustands als fundamentale Eigenschaft des Atoms, die nicht beeinflusst werden kann. Erst seit kurzer Zeit weiß man, dass dies durch die Wahl einer geeigneten Umgebung sehr wohl gelingt.

Eine solche Umgebung ist der geschilderte optische Resonator. Bringt man ein angeregtes Atom in einen solchen Hohlraum, kommt es zu einer exotischen Situation: Nachdem das Lichtteilchen emittiert worden ist, wird es im Resonator gespeichert und nach kurzer Zeit vom Atom wieder aufgenommen. Anschließend wird es erneut ausgesandt, und der Vorgang beginnt von vorne. Das Wechselspiel von Absorption und Emission endet erst dann, wenn das Photon wegen der Unvollkommenheit der Spiegel schließlich entweicht. Wird sein Verlust durch eine äußere Lichtquelle immer wieder ausgeglichen, lässt sich der pendelnde Energieaustausch zwischen Atom und Resonator im Prinzip beliebig lange aufrechterhalten.

Oszillationen zwischen gekoppelten Quantensystemen sind an sich nichts Neues. Der typische Fall ist die chemische Bindung zwischen gleichartigen

 (Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

Atomen, zum Beispiel zwei Sauerstoffatomen, die sich zum Molekül des Luftsauerstoffs vereinen. Dort können die Bindungselektronen zwischen beiden Partnern hin und her springen und gehören ihnen daher gemeinsam.

Bei dem zwischen Spiegeln gefangenen Atom verhält es sich ganz ähnlich: Hier sind es das Atom und der Resonator, die sich die Anregungsenergie teilen. Es entsteht eine Art Molekül aus einem Atom und einem Photon – eine „Ehe“ zwischen wahrhaft ungleichen Partnern! Und ihre Bindung ist mehr als eine platonische Idee der Quantenmechanik. Das im Resonator gespeicherte Photon hält das Atom tatsächlich fest – in einem Bauch der stehenden Welle, die das Photon bildet, wenn es zwischen den Spiegeln hin und her reflektiert wird.

Allerdings ist die Bindungsenergie des resultierenden „Moleküls“ so klein, dass sie nicht einmal einer sehr schwachen thermischen Atombewegung standhalten würde. Das Atom muss daher extrem gekühlt werden: Erst bei einem tausendstel Grad über dem absoluten Temperatur-Nullpunkt (–273,15 Grad Celsius) ist die Verbindung stabil.

Beim Überwinden dieser Hürde profitierten wir wiederum von technologischen Fortschritten aus jüngster Zeit: der Entwicklung äußerst effizienter Laserverfahren zur Kühlung von Atomen. Dabei senden Präzisionslaser Photonen aus, deren Impuls in Betrag und Richtung sehr genau definiert ist. Bei der Absorption durch ein Atom übertragen die Lichtquanten ihren Impuls, was sich zum Abbremsen des Teilchens nutzen lässt. Mithilfe mehrerer Laserstrahlen, deren Richtungen und Wellenlängen geschickt gewählt werden, kann man ein Atom so nahezu stoppen.

Nachweis der Paarbildung

Auf diese Weise ist Kimbles Team und meiner Forschergruppe in Garching kürzlich das Kunststück geglückt, ein einzelnes Atom zwischen zwei hoch reflektierende Spiegel einzusperren. Dort verband es sich mit dem anwesenden Photon zu dem theoretisch vorhergesagten Molekül. Das ungleiche Paar ließ sich immerhin einige Millisekunden lang beobachten.

Aber wie ist es überhaupt möglich, ein Atom-Photon-Molekül nachzuweisen? Dazu muss man zeigen, dass das Atom wegen der Bindung an das Lichtteilchen längere Zeit in einem Bauch der zugehörigen stehenden Welle festgehalten wird. Üblicherweise – zum Beispiel in einem Mikroskop – lässt sich der Ort eines Objekts ermitteln, indem man es mit Licht bestrahlt und dessen Streuung beobachtet. Ein einzelnes Atom aber ist so winzig, dass es nur wenige Photonen streut. Außerdem kann man nicht vorhersagen, in welche Richtung das Licht abgelenkt wird; größtenteils geht es daher am zumeist kleinen Detektor vorbei.

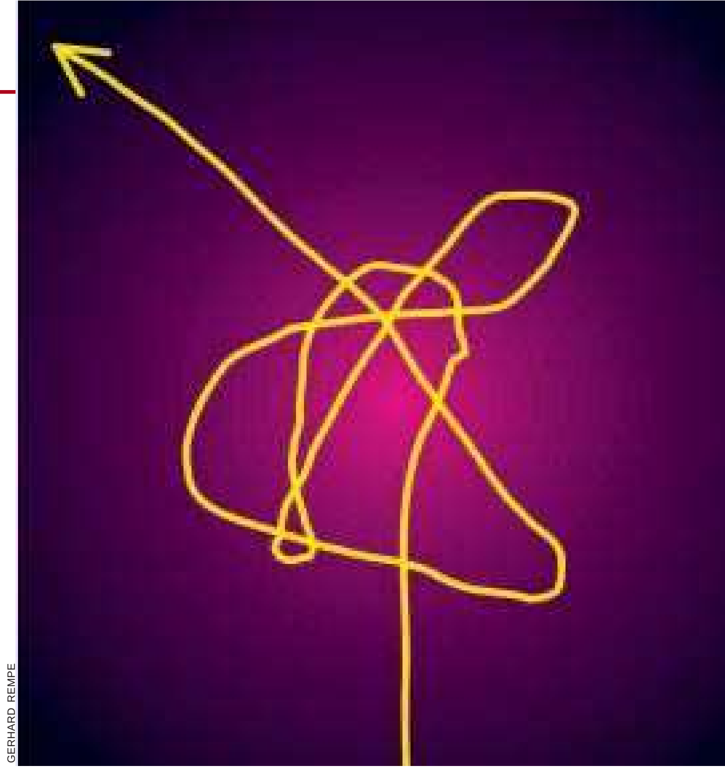
Bei dem im Resonator gefangenen Atom befinden sich die Physiker aber in einer sehr viel günstigeren Situation. Zum einen brauchen sie keine zusätzlichen Photonen, deren Streuung den Aufenthaltsort des Teilchens verrät; dazu kann das im Resonator hin und her reflektierte Lichtquant selbst dienen. Zum anderen hat die Geometrie des Systems eine stark ordnende Wirkung auf die Strahlungseigenschaften des Atoms: Sie zwängt das Licht gleichsam in ein geometrisches Korsett. Dadurch ▶

Dr. Gerhard Rempe *ist Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und Professor an der Technischen Universität München. Die Experimente haben Thomas Fischer, Peter Maunz, Peter Münstermann, Pepijn Pinkse und Thomas Puppe durchgeführt.*

sendet das Atom Photonen nur in Richtung der Resonator-Achse aus. Da die Lichtquanten nach einer gewissen Zeit den Resonator durch einen der beiden Spiegel hindurch verlassen, kann man sie mit einem hoch empfindlichen Photonenzähler messen, der exakt in Achsenrichtung zentriert ist.

Drittens schließlich beeinflusst die stehende Lichtwelle nicht nur die Richtung, sondern auch den Ort der Emission: Das Atom sendet Licht bevorzugt an einem Schwingungsbauch aus; an einem Knoten ist die Emission dagegen unterdrückt. Die Position des Atoms innerhalb der stehenden Lichtwelle lässt sich also unmittelbar aus der Lichtintensität ablesen, die ein Detektor hinter dem Spiegel registriert. Aus deren Verlauf konnten wir folglich die Bewegung des Atoms in Echtzeit verfolgen und seine Position auf einige tausendstel Millimeter genau bestimmen.

So aufregend diese Experimente waren, bilden sie allerdings nur die erste Etappe auf dem Weg zu einem viel weiter gesteckten Ziel. Statt der bloßen Beobachtung streben wir die gezielte Manipulation von Quantenzuständen an. Dahinter steckt die Hoffnung, dereinst kontrollierbare Quantensysteme nach dem Baukastenprinzip aus einzelnen Elementen zusammenfügen zu können – Grundlage künftiger Quantencomputer.



Eine Computersimulation illustriert die Bahn eines Atoms im Lichtfeld einzelner Photonen. Von unten kommend, umkreist das Atom auf einer etwas zittrigen Bahn die Achse des Resonators (senkrecht auf der Papier-Ebene), ehe es wieder entweicht. Die Umkreisung der Achse belegt die Bindung des Atoms an das Lichtfeld, dessen Stärke in Violett angedeutet ist. Die zittrige Bahnform ergibt sich aus Rückstößen bei der Aufnahme und Abgabe des Photons.

GERHARD REMPE

Einzelne Atome sind ideale Speichermedien für Quantenbits, und Photonen eignen sich bestens zur Informationsübertragung zwischen ihnen. Doch wie die Information abrufen? Bisher war völlig unklar, wie sich das in einem Atom gespeicherte Bit auf kontrollierte Weise in ein Lichtsignal verwandeln lässt. Unser geglücktes Experiment und das der Kollegen aus Pasadena eröffnet hier eine aussichtsreiche Möglichkeit. Denn das Atom-Photon-Molekül hat das Zeug zu einer Photonenpistole, die sozusagen per Knopfdruck ein einzelnes Lichtquant abschießt. Damit schließt sich die Lücke zwischen der Speicherung und der Übertragung von Quantenbits. Ein Jahrhundert nach Plancks „Akt der Verzweiflung“ herrscht unter seinen Erben daher erneut Aufbruchstimmung. ■

ZELLBIOLOGIE

Wie „Fallen“ Fusionen fördern

Bei der Ausschüttung von Hormonen und der Signalübermittlung zwischen Nervenzellen spielt die Verschmelzung von Membranen eine zentrale Rolle. Die komplizierte Steuerung solcher Fusionen wurde jetzt im Prinzip geklärt.

Von Michael Groß

Membranen hüllen die Zelle ein und begrenzen bei höheren Lebewesen jene zellinternen Unterabteilungen (Organellen), die jeweils eine spezielle Funktion ausüben – wie der Zellkern als Speicher der Erbinformation. Diese Aufteilung ähnelt in gewisser Weise der eines Hauses, wo Küche, Bad, Schlafzimmer und so weiter auch jeweils einem besonderen Zweck dienen und durch Mauern getrennt sind. Die Membranen der Zelle fungieren jedoch nicht nur als Trennwände – sie können bei Bedarf auch sehr biegsam sein und in Sekundenbruchteilen sogar innen und außen vertauschen.

Das geschieht zum Beispiel an Synapsen, den Schaltstellen zwischen Neuronen. Wenn dort ein Botenstoff (Neurotransmitter) ausgeschüttet wird, der ein Signal an die nächste Nervenzelle übermitteln soll, dauert das nur wenige Millisekunden. Diese enorme Geschwindigkeit ist deshalb möglich, weil ein Membranbläschen (eine Vesikel), das mit dem Botenstoff gefüllt ist, einfach mit der Zellmembran verschmilzt und dabei seinen Inhalt nach außen entlässt.

Zelluläre Türsteher

Auf ähnliche Weise werden auch Hormone freigesetzt und viele Stoffe innerhalb der Zelle von einem „Zimmer“ ins andere geschleust. Damit die richtigen Moleküle an den richtigen Ort kommen, muss allerdings gewährleistet sein, dass nur bestimmte Bläschen mit ganz bestimmten Membranen verschmelzen können. Wie die Zelle das bewerkstelligt, lag Jahrzehnte lang völlig im Dunkeln.

Erst 1993 entdeckte die Arbeitsgruppe von Thomas Söllner und James Rothman am Memorial Sloan-Kettering Cancer Center in New York eine Gruppe von Proteinen, welche die Transportprozesse zwischen den Abteilungen einer Zelle dirigieren. Der Name, den sie erhielten, ist ein Akronym, dessen Auflösung dem ▶

Laien nichts sagt, da es lediglich zu einem halben Dutzend ebenso kryptischer Abkürzungen führt. Allerdings lässt er sich auch als verständliches englisches Wort lesen: Snares. Seine deutsche Übersetzung lautet Falle, und die US-Forscher mögen bei der Namensgebung daran gedacht haben, dass diese Proteine ihr jeweiliges Gegenstück wie mit einer Falle einfangen.

Wie sich herausstellte, verfügen Bläschen und Zielmembranen jeweils über eigene Snares, die sich im Reagenzglas spezifisch zusammenlagern können. Daraus schlossen die Forscher, dass das v-Snare einer Vesikel quasi als Schlüssel fungiert, der nur ein passendes t-Snare-Schloss (nach englisch *target*) auf der richtigen Zielmembran zu öffnen vermag. In der Folge stellte sich heraus, dass v-Snares üblicherweise alleine, t-Snares hingegen zu dritt auftreten (wobei ein t-Snare genau genommen ein Protein-Fertigbaustein ist, der sowohl als Teil eines größeren Eiweißstoffs als auch allein auftreten kann).

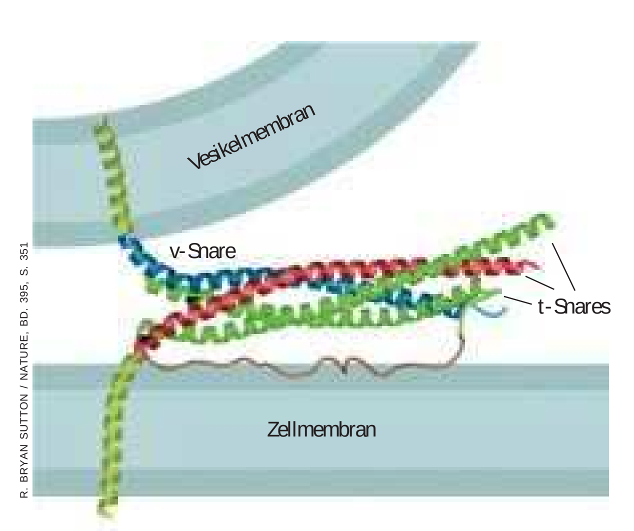
Die Schlüssel-Schloss-Hypothese von Söllner und Rothman war insofern attraktiv, als sie einen nachprüfbaren molekularen Mechanismus für die vorher rätselhafte Spezifität der Membranfusion postulierte. Doch sie ließ sich nur mühsam beweisen. Höhere Lebewesen besitzen meist eine verwirrende Vielfalt von Snares. Dass der Snare-Typus einer Vesikel festlegt, mit welcher Zielmembran sie verschmelzen darf, lässt sich nur auf eine Weise zeigen: Indem man zahlreiche Kombinationen von Schlüsseln und Schlössern durchprobiert.

Suche nach dem passenden Schlüssel

Dies gelang ansatzweise vor etwa einem Jahr. Damals ermöglichte es die komplette Entzifferung des Erbguts der Bierhefe *Saccharomyces cerevisiae*, alle Snare-Varianten dieses Organismus zu identifizieren und getrennt zu produzieren. Sie ließen sich, wie sich zeigte, vier strukturell verschiedenen Familien zuordnen, die auch in der Gensequenz deutlich voneinander abweichen. Diese Einteilung ist unabhängig von der Unterscheidung zwischen v- und t-Snares – beide Arten kommen in allen vier Familien vor.

Rothman und Mitarbeiter wählten nun eine Stichprobe von drei Schlössern (Triplets aus t-Snares, die sich in Membranen der Hefezelle finden) und probierten an diesen alle elf in der Hefe vorhandenen Schlüssel (v-Snares) durch. Dazu bauten sie beide Teile in getrennten Vesikeln ein; zur Vereinfachung des Versuchs verwendeten sie also auch für die Zielmembran ein Bläschen. Indem sie die Vesikeln mit verschiedenen Fluoreszenzfarbstoffen füllten, konnten sie die Verschmelzung der Bläschen anhand der Vermischung der Farben leicht verfolgen.

Das Ergebnis war bemerkenswert: Eine Vermischung fand nur statt, wenn ein Quartett von Snares zusammenkam, das genau einen Vertreter aus jeder der vier bekannten Familien enthielt. Dies erklärt auf einfache Weise, warum ausschließlich bestimmte Kombinationen von Membranen miteinander verschmelzen können.



Bei der Exocytose verschmilzt ein Bläschen (Vesikel) mit der Zellmembran und setzt so seinen Inhalt frei. Die Verschmelzung wird eingeleitet, indem sich spiralig gewundene „Ankermoleküle" – so genannte Snares – umeinander schlingen.

Offen blieb jedoch, wie der Schlüssel das Schloss entriegelt und welche Details in der Struktur für die Passung wichtig sind. Immerhin gab es einen ersten Anhaltspunkt. Schon 1998 hatte das Team von Axel Brunger an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) die Kristallstruktur eines vollständigen Snare-Quartetts durch Röntgenbeugung ermittelt; sie zeigt vier schraubenartig gewundene Helices, die sich ihrerseits umeinander winden (Bild). Diese „Coiled-Coil" entsteht anscheinend nur, wenn genau vier verschiedene Snares – je eines aus jeder der vier Familien – zusammenkommen.

Dieselbe Arbeitsgruppe ermittelte 1999 mit dem spektroskopischen Verfahren der kernmagnetischen Resonanz ein weiteres Detail: Danach liegen zumindest einige derjenigen Molekülbereiche, die letztendlich die Superschraube bilden, in den getrennten Einzelproteinen noch als bewegliche Schlaufen ohne feste Struktur vor. Dieser Hang zur Unordnung ist vermutlich auch der Grund, warum nur vom Gesamtkomplex, nicht aber von den Vorläufern Kristalle gezüchtet werden konnten. Kristalle bilden die Voraussetzung für eine Strukturanalyse mittels Röntgenbeugung.

Ersatzweise griff deshalb das Team von Yeon-Kyun Shin an der Iowa State University in Ames auf die Elektronenspinresonanz zurück, die sich ähnlich wie die kernmagnetische Resonanz zur Untersuchung der Beweglichkeit von Molekülteilen eignet. Es untersuchte mit diesem Verfahren den neuronalen t-Snare-Komplex, das heißt das in der Zellmembran an der Synapse vorhandene Schloss ohne Schlüssel (*Nature Structural Biology, Bd. 8, S. 308*).

Dabei zeigte sich, dass zwar wesentliche Teile der Helices im Gesamtquartett auch schon in dem Triplett auftauchen, andere Bereiche des Moleküls aber immer noch ungeordnet sind. Es steht also zu vermuten, dass diese Bereiche sich erst im Zuge der Begegnung mit dem v-Snare-Protein zu einer geordneten Raumstruktur arrangieren. Mit anderen Worten ist anscheinend der vereinte Informationsgehalt der beiden Proteinketten erforderlich, damit das Gebilde eine wohldefinierte Gestalt annimmt.

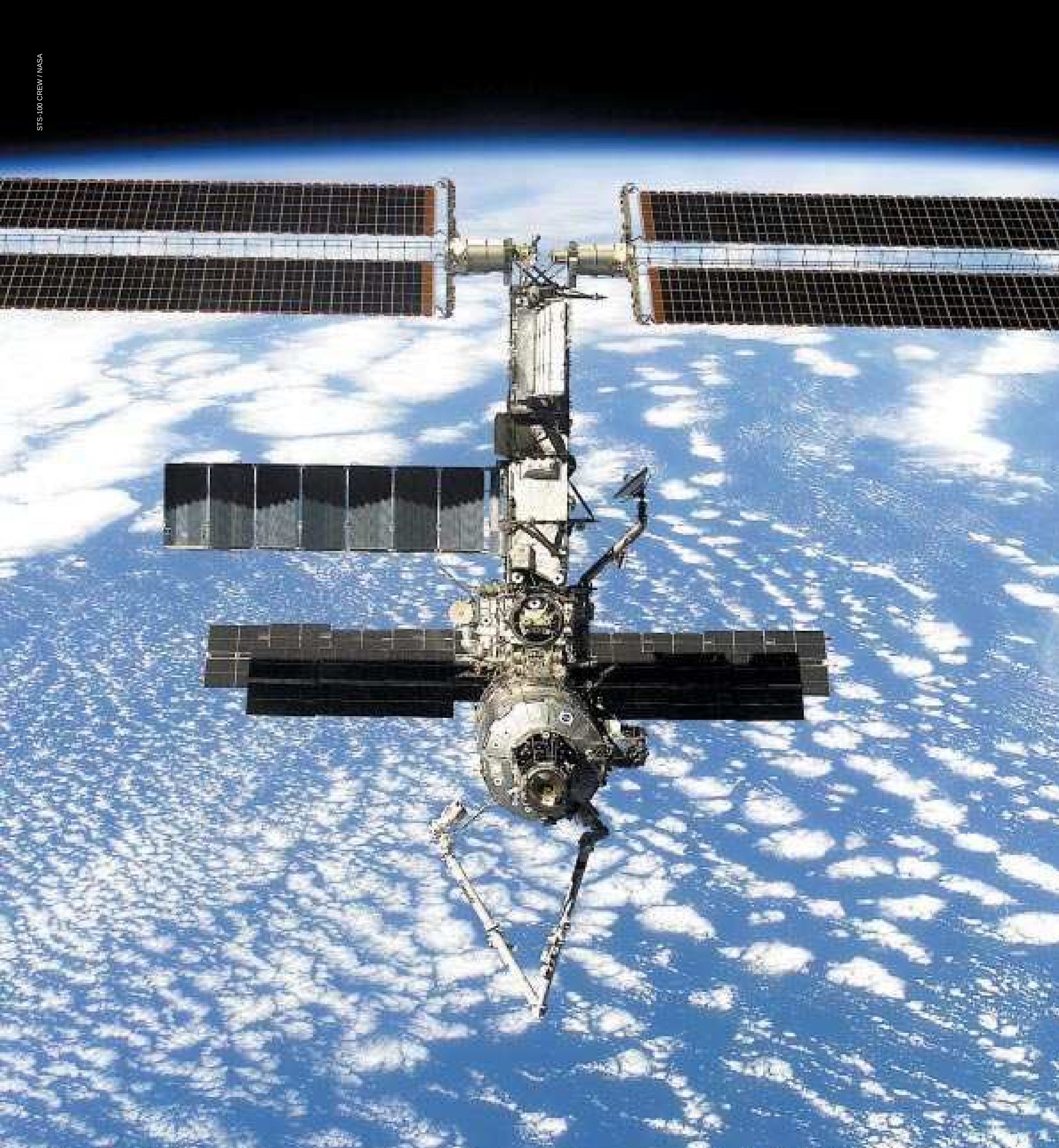
Ähnliche Beobachtungen wurden in den letzten zehn Jahren auch für viele andere Proteine gemacht, die ebenfalls ganz oder teilweise ungeordnet sind, bis sie an ihr Gegenstück andocken. Dies kann zu sehr starken Bindungen führen, wenn sich die beiden Moleküle bei dieser nachträglichen Faltung ineinander verschlingen.

Noch sind damit aber nicht alle Fragen zur Membranfusion beantwortet. So ist zum Beispiel die genannte Quartettregel zwar notwendig, aber keineswegs hinreichend für das Zustandekommen der Fusion. An der Steuerung dieses für alle höheren Lebewesen überlebenswichtigen Vorgangs sind also offenbar weitere Faktoren beteiligt. Die Suche danach wird die Zellbiologen noch eine Weile beschäftigen. Aber eines scheint jetzt schon klar: So einfach, wie wir zu Hause von einem Zimmer ins andere gelangen, ist es für die Inhaltsstoffe der Zelle nicht, den Aufenthaltsraum zu wechseln. ■

Überirdisches Insekt

Langsam, aber stetig nimmt die Internationale Raumstation ISS Gestalt an. Neueste Errungenschaft ist der kanadische Roboterarm Canadarm2, den die Crew der Raumfähre Endeavor bei ihrem letzten Besuch montierte. Die Endeavor-Besatzung schoss nach dem Ablegen von der Station dieses Foto. Mit dem Roboterarm als „Bein", dem US Lab als „Kopf" und den Solarpaddeln als „Flügeln" erscheint die ISS darauf wie ein riesiges Insekt, das 400 Kilometer über der Erde schwebt.

STS-100 CREW / NASA



Science and Fun

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

BUCHSTÜTZE EINSTEIN

Diese Buchstütze läßt Einstein für Ihre Literatur gerade stehen. Die auf 300 Exemplare limitierte Buchstütze ist aus äußerst stabilem Holz gefertigt, mit UV-Schutz versiegelt und steht auf einer Edelstahlplatte. Höhe ca. 20 cm; **DM 59,–**.



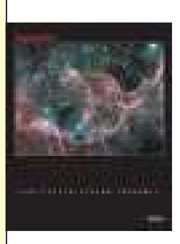
ARMBANDUHR „WELLE"



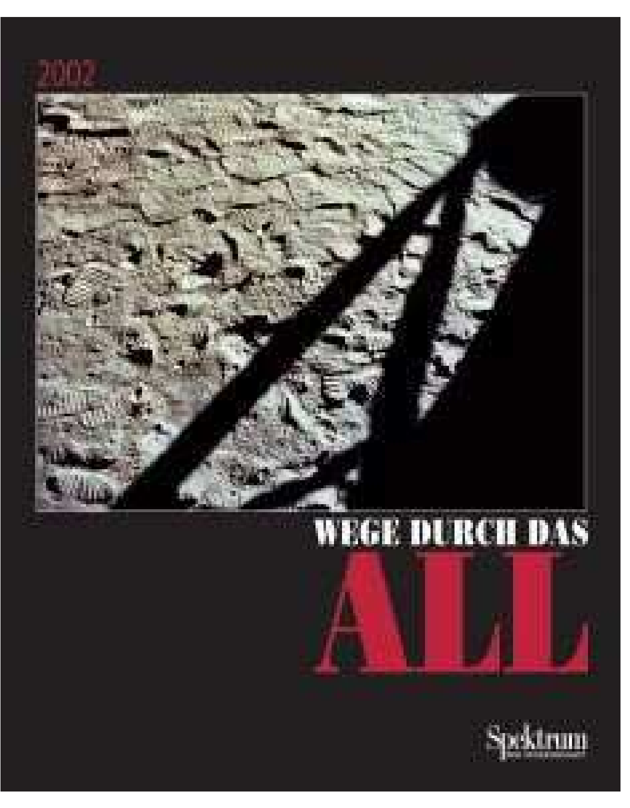
Analog einem Stein, der ins Wasser fällt, erzeugt ein Polystyrolfilm in einem elektrischen Feld eine Welle, die von einem einzigen Punkt ausgeht. Das Ergebnis ist eine selbstorganisierte Säulenstruktur, die dem Zifferblatt einer Uhr ähnelt. Das Motiv dieser neuen Spektrum-Armbanduhr entstammt dem vom DFG geförderten Forschungsprojekt „Nanostrukturen an Grenzflächen und Oberflächen" und lehnt sich an ein Foto von Erik Schäffer an. Armbanduhr „Welle" mit Edelstahlgehäuse, Lederarmband, nickelfrei, 3 ATM, 1 Jahr Garantie; **DM 84,–**.

KALENDER 2002: WEGE DURCH DAS ALL

Der Mensch macht sich auf, das Universum zu bereisen. Leistungsstarke Teleskope eröffnen den Blick in die ferne Vergangenheit, erkunden dabei die Geschichte des Universums und offenbaren atemberaubend Schönes. Unterdessen bekommt ein erdnussförmiger Asteroid Besuch von einer Raumsonde, kartieren Satelliten den Mars und warnen vor den stürmischen Ausbrüchen der Sonne. Dieser Spektrum-Kalender lockt mit 13 außerirdischen Reisezielen; sie alle sind erreichbar, zumindest in der Phantasie. Die Abbildungen sind hochglanzveredelt und kommen so auf dem matten schwarzen Fond besonders gut zur Geltung. Die Bilder werden auf einem zusätzlichen Kalenderblatt ausführlich beschrieben. Format 48 x 60 cm, Spiralbindung. Erscheinungstermin Ende August; **DM 69,–**.













JUNIOR WISSEN

MURMELBAHN

Die verschiedenen Würfel mit vielfältigen Bohrungen und Rinnen ermöglichen die Konstruktion von einfachen bis sehr komplizierten Murmelbahnen. Die richtige Kombination der Würfel ergibt Bahnen, die sowohl auf der Oberfläche der Würfel als auch in Tunneln im Innern derselben verlaufen. Der kleine Baumeister (ab 4 Jahren) bestimmt den Kugellauf ganz allein. Der Standardbaukasten von Cuboro enthält 54 Buchenholzwürfel (Kantenlänge 5 cm) mit 12 verschiedenen Funktionen; **DM 239,–**.





DAS LISTIGE AUGE

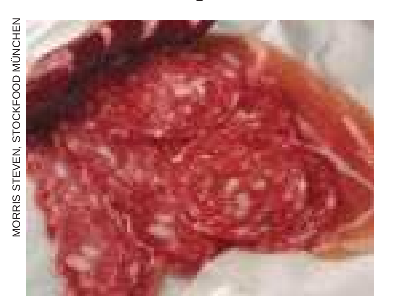
Neben verblüffenden Einsichten über das Sehen bietet der Experimentierkasten jede Menge Spiel und Spaß (ab 10 Jahren); **DM 99,–**.

INFORMATIONS- UND BESTELLSERVICE →

MIKROBIOLOGIE

Antibiotikaresistente Keime in Rohwürsten

Viele Viehzüchter verabreichen ihren Tieren vorsorglich Antibiotika, damit sie seltener erkranken und besser gedeihen. Kehrseite dieser weit verbreiteten Praxis: Sie fördert die Bildung resistenter Bakterien. Wie Wissenschaftler der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich nun in Rohwürsten (Salami, Landjäger und Mettwurst) nachgewiesen haben, können diese Keime in die Nahrungskette gelangen. So fand die Lebensmittelingenieurin Franziska Schwarz in einem aus einer Rohwurst isolierten Bakterium der Art *Enterococcus faecalis* Resistenzgene gegen zwölf Antibiotika. Enterococcen sind zwar für den Menschen nicht gefährlich. Die Bakterien können die Resistenzgene aber über Artgrenzen hinweg austauschen. Werden sie nach dem Verzehr einer Wurst im Darm auf potenzielle Krankheitserreger übertragen, kann dies insbesondere für Menschen mit schwachem Immunsystem fatale Konsequenzen haben.



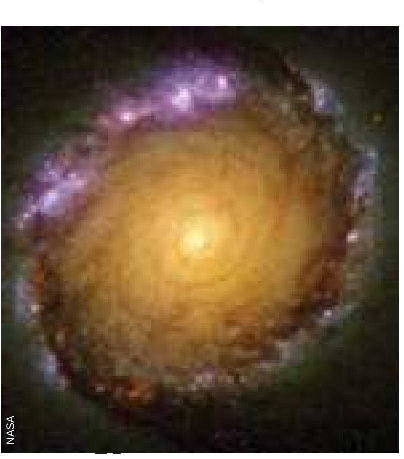
MORRIS STEVEN, STOCKFOOD MÜNCHEN

Sind Rohwürste gefährlich?

ASTRONOMIE

Galaktisches Feuerrad

Einen Durchmesser von 2400 Lichtjahren hat der spektakuläre Ring aus jungen Sternhaufen im Zentrum der Balken-Spiral-Galaxie NGC 1512. Er ist der Blickfang eines Farbbildes, das ein Astronomen-Team der Universität Tel Aviv und der Columbia-Universität in New York aus mehreren Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops zusammengesetzt hat. Die Forscher nehmen an, dass der (hier unsichtbare) riesige Balken der Galaxie Gas aus den äußeren Bereichen in den inneren Ring zieht, wo es zu Sternen kollabiert. Einige der jungen Sternhaufen sind noch von dem Staub umgeben, aus dem sie einst entstanden, und leuchten – wie die untergehende Sonne hinter dem Dunst der Atmosphäre – daher rot; andere haben keine Staubhülle mehr und erscheinen in klarem Blau. NGC 1512 liegt rund 30 Millionen Lichtjahre entfernt am Südhimmel im Sternbild Horologium (Pendeluhr) und lässt sich auch schon mit Amateur-Teleskopen beobachten. Mit einem Durchmesser von 70 000 Lichtjahren ist sie etwa genauso groß wie unser eigenes Milchstraßensystem. Aaron Barth vom Astronomen-Team hofft, mit den an NGC 1512 gewonnenen Erkenntnissen auch die Entstehung von Sternhaufen in sehr viel ferneren Galaxien besser verstehen zu können, die sich bildeten, als das Universum noch jung war.



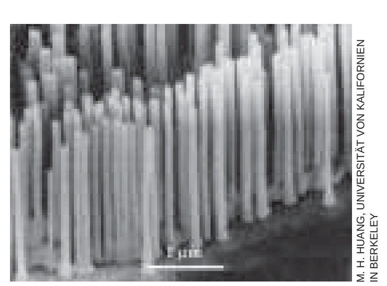
NASA

Junge Sternhaufen umgeben das Zentrum von NGC 1512.

PHOTONIK

Nanowald aus Laserstäbchen

Halbleiterlaser lassen sich klein und kostengünstig produzieren. Sie haben längst Alltagsgeräte wie den CD-Spieler erobert. Doch nur mühsam gelingt es, ihr Strahlungsspektrum in den kurzwelligen Bereich auszudehnen – eine Voraussetzung, um die Packungsdichte optischer Speichermedien weiter zu erhöhen. Jetzt präsentierte ein Team um Michael Huang von der Universität von Kalifornien in Berkeley einen neuartigen Typ von Lasern, die ultraviolettes Licht abstrahlen. Die Forscher ließen Zinkoxid verdampfen und sich auf einer mit Gold beschichteten Saphir-Platte niederschlagen. Dabei bildete es nicht den sonst üblichen Film; vielmehr wuchs auf der Oberfläche ein Wald aus feinsten Stäbchen empor. Nach wenigen Minuten hatten die glasklaren kristallförmigen Nadeln eine Länge von einigen tausendstel Millimetern erreicht (Bild). Weil ihre glatten Endflächen wie Spiegel wirken, sind die Stäbchen perfekte Laserresonatoren. Beleuchtet man sie von der Seite, strahlen sie in Längsrichtung ultraviolettes Licht ab. Da diese Nanolaser unkompliziert und zudem billig in der Herstellung sind, steht ihrer Massenproduktion nach Ansicht der Forscher nichts im Wege. *(Science, Bd. 292, S. 1897)*



M. H. HUANG, UNIVERSITÄT VON KALIFORNIEN IN BERKELEY

Jede dieser Zinkoxid-Nadeln ist ein winziger Laser.

MEDIZIN

Vermehrung von Prionen im Reagenzglas

Für seine These wurde Stanley Prusiner erst als Ketzer verfemt, dann mit dem Nobelpreis geehrt: Nicht Viren oder Bakterien, sondern Eiweißmoleküle sollten tödliche Hirnerkrankungen wie BSE verursachen. Die Erreger seien so genannte Prionen, falsch gefaltete Formen eines harmlosen körpereigenen Proteins, die sich vermehren, indem sie den normalen Molekülen ihre Struktur aufzwingen. Mit einem Trick konnten Forscher um Claudio Soto vom Serono Pharmaceutical Research Institute in Genf diese Vermehrung jetzt erstmals im Reagenzglas nachweisen. Sie entnahmen infizierten Hamsterhirnen den krankmachenden Stoff und mischten winzige Spuren davon mit der harmlosen Eiweißform. Dabei lagerten die Prionen zwar die körpereigenen Proteine an und wandelten sie in die bösartige Form um. Da sie jedoch große Molekülaggregate bildeten, nahm die Zahl der infektiösen Partikel nicht zu. Dies geschah erst, als die Forscher die Aggregate immer wieder durch Ultraschall aufbrachen. Auf diese Weise erreichten sie, dass der Anteil der Prionen auf 97 Prozent anstieg. Ließe sich der BSE-Erreger auf ähnliche Weise vervielfältigen, könnte man die Infektion am lebenden Rind anhand von Blutproben diagnostizieren. *(Nature, Bd. 410, S. 810)*

ARCHÄOLOGIE

Versunkene antike Hafenstadt



C. GERIGK/FRANCK GODDIO HILTI FOUNDATION

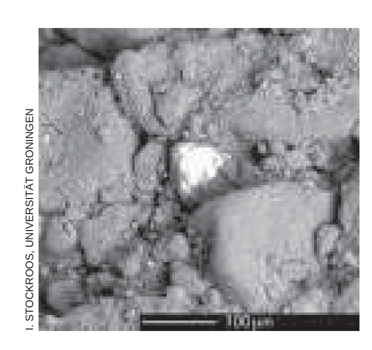
Unter Wasser entdeckt: Statue von Hâpi, dem Gott der Nil-Überschwemmungen

In sechs bis zehn Metern Wassertiefe hat ein französisch-ägyptisches Forscherteam vor der ägyptischen Küstenstadt Abukir nahe Alexandria Bauwerke und Hafenanlagen einer vor tausend Jahren versunkenen Stadt entdeckt. Der Teamleiter Franck Goddio – Mathematiker, Taucher und Hobbyarchäologe – sieht in den Ruinen das in griechischen Mythen erwähnte Herakleion. Dafür spricht eine fast zwei Meter hohe Stele aus schwarzem Granit, auf der die Stadt Herakleion-Thonis als Aufstellungsort erwähnt wird. Laut der in kunstvollen Hieroglyphen gemeißelten Inschrift waren zehn Prozent Zoll auf griechisches Handwerk und Waren zu Gunsten von Neith, der Schutzgöttin des Mittelmeers, zu entrichten. Zu den eindrucksvollen Fundstücken zählen außerdem zehn antike Schiffswracks, Kolossalstatuen eines Pharaos und einer Königin sowie eine Statue von Hâpi, dem Gott der Nil-Überschwemmungen. Zwei Jahre lang hatte das Team mit elektronischen Geräten in dem stark verschmutzten Wasser gesucht, bis es 6,5 Kilometer vor der Küstenlinie fündig wurde. Wahrscheinlich wurde die Hafenstadt durch ein Erdbeben zerstört und später überschwemmt.

ZOOLOGIE

Die Wasserwaage der Hornissen

Ihr Stich ist nicht schlimmer als der einer Wespe. Die wenig angriffslustigen Hornissen sind also zu Unrecht gefürchtet. Eher verdienen sie Respekt als Baumeister. Denn hinter der papierartigen Hülle ihres imposanten Nestes verbirgt sich ein Etagenbau aus Waben, den sie – so die neueste Erkenntnis – offenbar mit einer Art Wasserwaage austarieren. Beim Bau einer Zelle fertigt eine Hornisse zuerst das Dach. Dabei wölbt sie konzentrische Ringe, glättet diese von innen und klebt darauf eine Verkleidung aus Partikeln und Fasern. Am Gipfelpunkt lässt sie, wie ein niederländisch-israelisches Team um Ietse Stockroos von der Universität Groningen jetzt berichtet, stets eine kleine Vertiefung. In die setzt sie wie einen Schlussstein einen 0,1 Millimeter großen Kristall des magnetischen Minerals Ilmenit (Eisentitanoxid). Während die Insekten nun Zelle an Zelle fügen, ausnahmslos jede mit einem Kristall, entsteht ein Gitter aus magnetischen Punkten. Da die Tiere über einen magnetischen Sinn verfügen, könnten sie damit die exakte Anordnung der Wabenzellen laufend überprüfen. *(Nature, Bd. 411, S. 654)*



I. STOCKROOS, UNIVERSITÄT GRONINGEN

Ein magnetischer Kristall krönt jede Wabe im Hornissennest.

PALÄONTOLOGIE

Die Erfindung des Kauens

Statt nur zarte Blättchen, Blüten oder Knospen zu zupfen und sofort zu schlucken, begannen die Vorfahren der Säugetiere schon vor 260 Millionen Jahren damit, harte Blätter zu zerkauen. Dies stellten Natalia Rybczynski und Robert Reisz von der Universität von Toronto in Mississauga fest, als sie den 1990 in Zentralrussland gefundenen Schädel eines 30 Zentimeter langen Wirbeltiers mit dem Mikroskop auf typische Kratzer an den Zähnen untersuchten. Anders als bei Krokodilen und Leguanen liegen bei *Suminia getmanovi* die Flächen der Backenzähne aufeinander und können mahlend gegeneinander bewegt werden. Mit dieser im Laufe der Evolution mehrfach erfundenen Technik konnten die Wirbeltiere neue Nahrungsquellen erschließen und die Nährstoffe schneller in Energie umwandeln. Damit veränderte sich die gesamte Nahrungskette des Ökosystems: Während vorher fast alle Tiere räuberisch lebten, konnten sie nun auch in großem Umfang Pflanzen als Nahrung nutzen. Dies dürfte auch die explosionsartige Zunahme der Artenvielfalt und Individuenzahl bei den Landtieren im Oberen Perm erklären. Reisz vermutet sogar, dass der effektivere Stoffwechsel zu der hohen Körpertemperatur der Warmblüter führte. *(Nature, Bd. 411, S. 684)*



ROBERT REISZ, UNIVERSITÄT VON TORONTO IN MISSISSAUGA

Mit seinem Gebiss konnte *Suminia getmanovi* auch harte Pflanzen zermahlen.

Methusalem-



In den Außenregionen des Milchstraßensystems liegt der Kugelsternhaufen M 80. Er enthält viele Rote Riesen – Sterne am Ende ihres Entwicklungsweges. Bis vor kurzem schätzten die Astronomen das Alter dieser Sterne höher ein als das Alter des Universums. Inzwischen ist das Paradox im Wesentlichen aufgelöst.



HUBBLE HERITAGE TEAM

Sterne und die Lösung der Alterskrise in der Kosmologie

Vor wenigen Jahren noch schienen manche Sterne älter zu sein als das Universum. Korrekturen in der Kosmologie, aber auch modifizierte Sternmodelle und neue Daten haben die Krise entschärft.

Von Brian C. Chaboyer

Vor einigen Jahren machte die „kosmologische Alterskrise“ Schlagzeilen: Die Messung der kosmischen Expansionsgeschwindigkeit hatte für das Universum ein Alter von maximal 14 Milliarden Jahren ergeben. Die ältesten Sterne des Alls wurden hingegen auf mindestens 15 Milliarden Jahre geschätzt. Die offensichtliche Diskrepanz – schließlich können auch Kinder nicht älter sein als ihre Mütter – gab den Astronomen Rätsel auf. Heute spricht kaum jemand noch von einer Alterskrise. Was hat sich geändert?

Die Wissenschaftsgeschichte bietet eine Fülle vergleichbarer Diskrepanzen, und meistens löste ihre Überwindung bedeutende Erkenntnisschübe aus. So stimulierte die Debatte über das Alter der Erde Charles Darwin zu seiner Evolutionstheorie. Kontroversen über das Alter der Sonne konnten die Astrophysiker erst beilegen, nachdem sie Kernfusionsreaktionen im Sterninneren als Mechanismus der Energieerzeugung erkannt hatten. Und die Vorstellung eines ewigen und unveränderlichen Universums überwand Edwin Hubble durch seine Entdeckung der allgemeinen Galaxienflucht.

Auch die kosmologische Alterskrise war Auslöser für eine Erkenntnisrevolution: Die Expansion des Weltalls wird offenbar maßgeblich von einer „Dunklen Energieform“ bestimmt, über deren sonstige Eigenschaften die Astrophysiker bisher kaum etwas wissen (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 30). Seit Kosmologen diese unbekannte Energieform berücksichtigen, liefern ihre Modelle ein höheres Weltalter. Bei dieser Dunklen Energie handelt es sich weder um normale Materie, die aus Atomen besteht, noch um die schon länger bekannte Dunkle Materie, die bis zu 90 Prozent der Masse von Galaxien ausmacht. Aber diese neue Entwicklung in der Kosmologie trug ihren Teil zur Lösung bei.



Noch als die kosmologische Alterskrise in Fachkreisen lebhaft debattiert wurde, hatten die meisten Astronomen den Fehler auf die Kosmologen und deren Berechnungen des Weltalters geschoben. Theoretiker misstrauten der Messung der kosmischen Expansionsgeschwindigkeit. Hingegen argwöhnten Beobachter, die kosmologischen Modelle der Theoretiker seien inkorrekt. Nur eine Minderheit von Forschern zweifelte an der Abschätzung des Sternenalters.

Ein halbes Jahrhundert lang war die kosmische Expansionsgeschwindigkeit Gegenstand einer oft scharf geführten Debatte. Im Gegensatz dazu schienen mehrere Forscher das Alter der ältesten Sterne äußerst zuverlässig abgeschätzt zu haben: Von Mitte der sechziger bis Mitte der neunziger Jahre lieferten die Modelle zur Sternentwicklung stets Alterswerte von 15 Milliarden Jahren oder darüber.

Diese Abschätzungen haben sich seitdem als falsch herausgestellt. Mit Hilfe der präzisen Entfernungsmessungen des Astrometrie-Satelliten Hipparcos und neuerer Theorien der Sternentwicklung schätzen die Astrophysiker die ältesten Sterne nun auf maximal 13 Milliarden Jahre. Damit ist die Alterskrise überwunden. Es gilt wieder: Kinder sind jünger als ihre Eltern – und alle Sterne sind jünger als das Weltall, das sie einst hervorbrachte.

Angenommen, der Kilometerzähler Ihres Autos sei kaputt. Dann könnten Sie die zurückgelegte Strecke trotzdem bestimmen: Sie sollten nur wissen, wie viel Liter Ihr Benzintank fasst und wie viel Benzin Ihr Auto pro Kilometer verbraucht. Die beiden Werte müssten Sie lediglich durcheinander dividieren. Mit einer ähnlichen Rechnung lässt sich auch das Alter eines Sterns berechnen: Dem Benzintank entspricht die Masse des Sterns, dem Verbrauch seine nukleare Brennrate.

Während des überwiegenden Teils ihres Daseins decken Sterne ihren Energiebedarf durch die Fusion von Wasserstoffkernen in ihrem sehr heißen und dichten Zentralbereich. Jeweils vier Wasserstoffkerne (jeder ein einzelnes Proton) verschmelzen dabei in einer Reaktionskette letztlich zu einem Heliumkern (mit zwei Protonen und zwei Neutronen), der 0,7 Prozent weniger Masse hat als die vier einzelnen Ausgangsteilchen. Dieser Massendifferenz entspricht laut Einsteins berühmter Formel $E=mc^2$ die freigesetzte Energie. Unsere Sonne zum Beispiel strahlt 4×10^{26} Watt in Form von Licht aus und muss dafür jede Sekunde 600 Millionen Tonnen Wasserstoff in Helium umwandeln.

Die Masse des Sterns bestimmt seine Lebensdauer

Auf diese Weise verbrennt die Sonne in einer Milliarde Jahren ein Prozent ihrer Masse. Da etwa ein Zehntel ihres gesamten Wasserstoffvorrats die für die Fusion erforderliche Temperatur und Dichte aufweist, kann sie ihre Strahlungsenergie ungefähr zehn Milliarden Jahre lang aus dem Verbrennen von Wasserstoff beziehen. Während dieser Zeit bleiben ihre Leuchtkraft und Oberflächentemperatur annähernd konstant.

In Sternen, deren Masse größer ist als diejenige der Sonne, laufen die Fusionsreaktionen rascher ab, weil Temperatur und Druck im Zentralbereich höher sind. Solche Sterne brauchen ihren Brennstoff deshalb erheblich schneller auf – obwohl sie anfangs mehr davon haben.

Im Nebel NGC 3603 finden sich Sterne ganz verschiedener Entwicklungsstufen auf engstem Raum: kollabierende Gaswolken, in denen gerade Sterne entstehen (1), Protosterne mit protoplanetaren Scheiben (2), ein Haufen heißer junger Sterne (3) und ein sterbender Stern, der Gasringe (4) und Gasschwaden (5) ausstößt.

Der genaue Zusammenhang zwischen Anfangsmasse und Lebenserwartung eines Sterns ergibt sich aus den physikalischen Gesetzen, die seinen Aufbau bestimmen. Es sind dies

➤ das hydrostatische Gleichgewicht (es besagt, dass sich Gravitations- und Gasdruck die Waage halten);

➤ das ideale Gasgesetz (es beschreibt den Zusammenhang von Temperatur, Druck und Dichte);

➤ die Energietransportgleichung (die den Energiefluss im Inneren des Sterns beschreibt);

➤ die Energieerhaltung (die besagt, dass genau so viel Energie im Stern erzeugt wie nach außen abgestrahlt wird).

Insgesamt ergibt sich aus diesen Gesetzen, dass die Leuchtkraft eines Wasserstoff verbrennenden Sterns ungefähr mit der vierten Potenz der Masse (M^4) zunimmt. Da der verfügbare Brennstoff selbst proportional zur Masse ist, variiert die Lebensdauer proportional zu $M/M^4 = M^{-3}$. Ein Stern mit der zehnfachen Masse der Sonne strahlt also im Vergleich zu ihr zehntausendmal so hell, hat aber nur ein Tausendstel ihrer Lebenserwartung, nämlich nur zehn Millionen Jahre. Massereiche Sterne sind gewissermaßen die Sportwagen des Universums: Sie sehen eindrucksvoll aus, haben aber einen abnorm hohen Verbrauch.

Hat ein Stern seinen zentralen Wasserstoffvorrat aufgebraucht, schrumpft sein Inneres so lange, bis dort die Kernfusion des Heliums zündet. Gleichzeitig verlagert sich die Wasserstofffusion in eine den Zentralbereich umgebende Schicht. Daraufhin bläht sich der Stern zu einem so genannten Roten Riesen auf: Dieser hat nun eine geringere Oberflächentemperatur als der ursprüngliche Stern, sodass er nicht mehr weiß, sondern nur noch rot glüht. Seine Leuchtkraft ist indes höher als zuvor, weil seine Oberfläche um ein Vielfaches zugenommen hat.

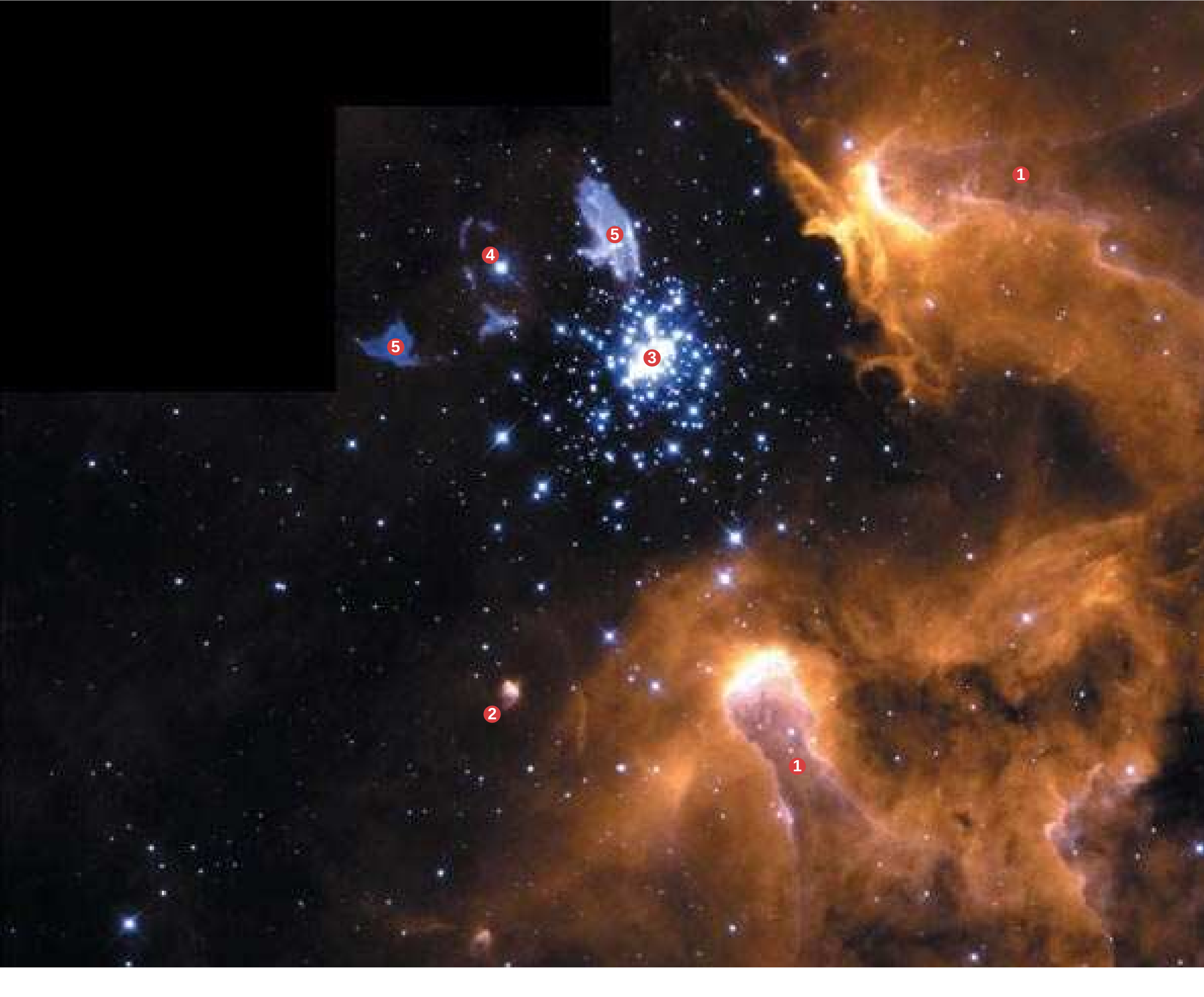
Die Heliumfusion liefert dem Stern weit weniger Energie als die Wasserstofffusion. Da er zugleich sehr viel stärker leuchtet, erschöpft sich dieses Energiereservoir binnen weniger Millionen

Die kosmologische Alterskrise

Bei kosmologischen Fragen führt der gesunde Menschenverstand bisweilen in die Irre, aber hier liegt er gewiss richtig: Das Universum muss älter sein als die ältesten Sterne. Bizarrerweise schienen die Beobachtungsdaten lange das Gegenteil zu belegen. Die Mehrheit der Forscher vermutete den Fehler in der Kosmologie, aber wie sich herausstellte, lag er hauptsächlich in der Physik der Sterne.

Viele der ältesten Sterne finden sich in Kugelhaufen. Diese reizvollen Beobachtungsobjekte bestehen aus Hunderttausenden bis einigen Millionen Sternen, die alle etwa zur selben Zeit entstanden und gravitativ in einem System gebunden sind. Massereiche Sterne leuchten sehr hell und verbrauchen ihren Wasserstoff viel schneller als die Sonne: Sterne sind umso langlebiger, je masseärmer sie sind.

Daher verraten die massereichsten Sterne, die sich in einem Haufen finden lassen, auch dessen Alter. Messungen des Astrometrie-Satelliten Hipparcos ermöglichten die Korrektur vorher akzeptierter Schätzungen: Kugelsternhaufen sind weiter entfernt als zuvor angenommen. Die hellsten Sterne in ihnen sind also heller – und damit jünger. Seitdem steht ihr maximales Alter, 13 Milliarden Jahre, nicht mehr im Widerspruch zum Alter der Welt.



Jahre. Immer hektischer zünden nun in dem Stern Fusionsreaktionen schwererer Atomkerne, bis beim Eisen alle Möglichkeiten erschöpft sind.

Diese Entwicklung eines Sterns lässt sich am besten in einem so genannten Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) darstellen, in dem die Astronomen die Leuchtkraft gegen die Oberflächentemperatur auftragen. Alle wasserstoffbrennenden Sterne verteilen sich im HRD entlang einer Linie, der so genannten Hauptreihe. Am Ende der „Hauptreihenphase", wenn ein Stern zum Roten Riesen wird, verlässt er die Hauptreihe nach rechts (siehe Kasten auf Seite 32).

Auch wenn Astronomen relativ leicht die gesamte Lebenserwartung eines Sterns abschätzen können, so ist es doch unmöglich, sein momentanes Alter oder seine restliche Lebensdauer zu bestimmen. Dazu müsste man die Masse des bisher erzeugten Heliums kennen. Aber dieses verbleibt im Zentrum des Sterns und gelangt nicht an seine Oberfläche, sodass es nicht zu beobachten ist.

Kugelsternhaufen

Solange sich ein Stern in der Hauptreihenphase befindet, lässt sich deshalb von ihm nur sagen, dass er jünger als seine Lebenserwartung sein muss. Erst wenn er zum Roten Riesen wird, offenbart er sein Alter. Deshalb untersuchen die Astronomen bevorzugt solche Sterne, die sich in einer größeren Ansammlung befinden, also etwa gleichzeitig entstanden sein müssen. Das Alter eines solchen Haufens ergibt sich aus der Masse derjenigen Sterne in ihm, die gerade die Phase des Wasserstoffbrennens abgeschlossen haben und die Hauptreihe verlassen.

Ein spezieller Typ von Sternansammlungen, die so genannten Kugelsternhaufen, enthalten offenbar einige der ältesten Sterne, die in unserer Galaxis anzutreffen sind. In diesen Haufen drängeln sich 100000 bis zu einigen Millionen Sterne in einem kugelförmigen Raumgebiet von vielleicht nur hundert Lichtjahren Durchmesser. Den Bewohnern eines fiktiven Planeten in einem Kugelsternhaufen böte sich ein imposanter Nachthimmel: Sie könnten rund hunderttausend Sterne erblicken, im Gegensatz zu den etwa 3000, die wir mit bloßem Auge am irdischen Firmament sehen können.

Während drei Viertel aller Sterne des Milchstraßensystems – darunter auch die Sonne – in einer flachen Scheibe um das Zentrum der Galaxis kreisen, bewegen sich die Kugelsternhaufen in einem sphärischen „Halo", der die galaktische Scheibe wie eine Hülle umgibt. Auch andere große Galaxien haben einen Halo aus Kugelsternhaufen.

Aus dem Aufenthaltsort dieser Haufen ergeben sich Rückschlüsse auf ihr ▶



Alter. In den 40er Jahren war nämlich dem deutschen Astronomen Walter Baade, der am Mount Wilson-Observatorium in den USA arbeitete, eine unterschiedliche Verteilung der Sterne aufgefallen:

- Helle, blau leuchtende Sterne befinden sich bevorzugt in der Scheibe einer Galaxie;
- Sterne im Halo leuchten generell schwächer und rötlicher.

Baade kannte die Ursachen für diese beiden Kategorien noch nicht. Er bezeichnete die hellen, blauen Sterne schlicht als „Population I“ und die lichtschwächeren roten als „Population II“. Heute kennen wir den Grund: Die galaktische Scheibe enthält große Mengen an Gas, den Grundstoff neuer Sterne, von denen die massereichsten hohe Leuchtkraft und hohe Oberflächentemperatur haben, also bläulich erscheinen. Der Halo ist jedoch arm an Gas – wie in einer Stadt, in der es kaum Nachwuchs gibt, dominieren die Alten die Population.

Möglicherweise handelt es sich bei Kugelsternhaufen um Relikte der Urbausteine, aus denen sich das Milchstraßensystem einst geformt hat. Elemente, die schwerer sind als Helium, treten nämlich in Kugelsternhaufen nur mit einem Massenanteil von 0,01 bis 0,5 Prozent auf, während ihr Anteil in der Sonne immerhin zwei Prozent beträgt. Mit Ausnahme von Lithium können diese Elemente – Astronomen nennen sie zum Verdruss der Chemiker insgesamt „Metalle“ – nicht im Urknall, sondern nur durch stellare Kernfusionsprozesse entstanden sein. Die „metallarmen“ Sterne der Kugelhaufen scheinen sich also aus nahezu jungfräulicher kosmischer Materie kurz nach dem Urknall gebildet zu haben.

Der Metallgehalt ist wichtig

Innerhalb eines bestimmten Kugelhaufens zeigen alle Sterne, die gerade ihren zentralen Wasserstoffvorrat aufgebraucht haben, nahezu dieselbe Helligkeit und Oberflächentemperatur – ähneln sich also auch in Masse und Alter. In einem Hertzsprung-Russell-Diagramm macht sich dies zu großen Leuchtkräften hin durch ein abruptes Ende der Hauptreihe bemerkbar. Masseärmere, langlebigere Sterne gibt es noch in großer Zahl; die massereicheren sind jedoch bereits zu Roten Riesen geworden und haben die Hauptreihe verlassen. Der scharfe Knick in der Hauptreihe ist ein untrügliches Indiz für das übereinstimmende Alter aller Mitglieder eines Kugelhaufens.

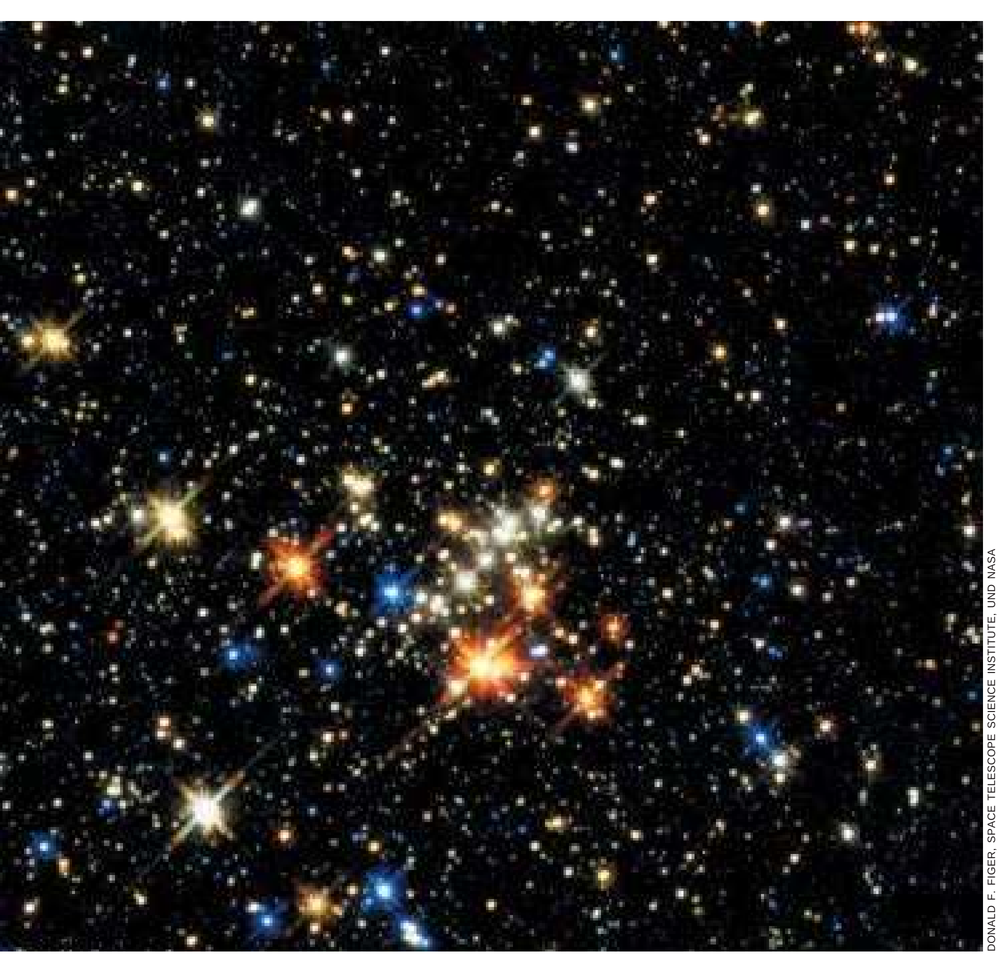
Die Astronomen können deshalb das Alter eines Kugelsternhaufens relativ einfach ermitteln, wenn sie die Zustandsgrößen der Haufenmitglieder in ein Hertzsprung-Russell-Diagramm eintragen. Aus Leuchtkraft und Oberflächentemperatur des Abknickpunktes im Diagramm brauchen sie nur anhand ihrer theoretischen Modelle auf die zugehörigen Werte für Masse und Alter der Sterne zu schließen.

Die Genauigkeit dieses Verfahrens wird allerdings durch drei Faktoren beeinträchtigt:

- Erstens: Die Entwicklung eines Sterns hängt von seiner genauen chemischen Zusammensetzung ab.
- Zweitens: Der Aufbau der Sterne ist noch nicht in allen Details verstanden.
- Drittens: Die Umrechnung der beobachteten Helligkeit eines Sterns in seine tatsächliche Leuchtkraft ist mit Fehlern behaftet.

Zum ersten Punkt: Metalle haben zwar nur einen winzigen Anteil an der Gesamtmasse eines Sterns, doch beein-

Der riesige Kugelhaufen Mayall II umkreist die Andromeda-Galaxie als Trabant. Fast alle seine Sterne bildeten sich zur selben Zeit.



DONALD F. FIGER, SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE, UND NASA

Der „Fünflingshaufen“ nahe dem Zentrum der Galaxis ist ein jüngerer, so genannter offener Sternhaufen mit Sternen gleichen Alters.

flussen sie seinen Aufbau erheblich. Sie tragen nämlich aufgrund ihrer größeren Masse zum Gravitationsdruck bei, was höhere Werte für Druck und Temperatur im Zentralbereich und somit eine stärkere Energieerzeugung durch Kernfusion zur Folge hat. Zudem absorbieren Metalle Strahlung stärker, was den Energietransport aus dem Zentrum zur Oberfläche behindert. Infolgedessen bläht sich der Stern leicht auf, und die Energieabstrahlung erfolgt von einer größeren Oberfläche mit geringerer Temperatur. Alles in allem bedeutet dies, dass ein metallarmer Stern heller und heißer ist als ein metallreicher Stern derselben Masse. Wenn die Astronomen also den Metallgehalt eines Sterns überschätzen sollten, unterschätzen sie seine Masse und sein Alter.

Die chemische Zusammensetzung eines Sterns erschließen die Forscher aus seinem Spektrum. Denn jedes Element in der Sternatmosphäre verursacht bei ganz bestimmten Wellenlängen scharfe Absorptionslinien, deren Stärke wiederum von der Konzentration der absorbierenden Atome abhängt. In den letzten Jahren konnten die Astronomen ihre Daten laufend optimieren: Durch größere Teleskopspiegel und den Einsatz digitaler Photonenempfänger erhöhten sie die Auflösung und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Spektren. Dadurch reduzierten sich die Messfehler in den Daten um den Faktor drei. Aktuelles Beispiel: Mit dem Zehn-Meter-Spiegel des Keck-Teleskops auf Hawaii ermittelten kürzlich Judith G. Cohen vom California Institute of Technology, Raffaele G. Gratton von der Sternwarte in Padua und Kollegen den Metallgehalt der Kugelsternhaufen NGC 6528 und NGC 6553 mit nie zuvor erreichter Genauigkeit.

Korrektur der Datenbasis

Zum zweiten Punkt: Die Theorie des Sternaufbaus beschreibt nur näherungsweise, was in einem Stern tatsächlich vorgeht. Beispiel Sonne: Die von der Raumsonde Soho registrierten seismischen Wellen in der Sonne enthüllten, dass Helium langsam ins Zentrum unseres Muttergestirns absinkt. Diese Beobachtungen gelangen Jørgen Christensen-Dalsgaard von der Universität Århus, David B. Guenther von der Saint Mary's-Universität in Halifax (Kanada) und anderen Kollegen.

Das absinkende Helium verdrängt nun im Zentralbereich der Sonne einen Teil des dortigen Wasserstoffs. Dadurch verringert sich der Vorrat an nutzbarem Brennstoff und somit auch die Lebenserwartung der Sonne. Meine Kollegen und ich haben die Modellierung anderer Prozesse – etwa der Konvektion – überarbeitet, um besser zu verstehen, wie das Gas auf Änderungen von Druck und Temperatur reagiert. Im Endeffekt reduzieren unsere Ergebnisse das berechnete Alter der Kugelsternhaufen um 14 Prozent. Sternmodelle simulieren inzwischen das Verhalten der Sonne so zuverlässig, dass nur schwer zu sehen ist, wo diese noch verbessert werden könnten.

Der dritte Punkt ist der größte Unsicherheitsfaktor für die Altersbestimmung. Aus der beobachteten Helligkeit eines Sterns lässt sich dessen Leuchtkraft nämlich nur dann ermitteln, wenn man seine Entfernung kennt, und Entfernungsmessungen zählen in der Astronomie zu den schwierigsten Aufgaben überhaupt.

Um die dritte Dimension der uns flächig erscheinenden Himmelssphäre zu erschließen, müssen die Astronomen unterschiedliche, einander überlappende Methoden anwenden (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 50, und 1/1993, S. 46). Die erste Sprosse der „kosmischen Entfernungsleiter“ bildet die Parallaxe – eine scheinbare Positionsverschiebung des Zielobjekts auf Grund eines Standortwechsels des Beobachters. Zur Demonstration des Effektes braucht man nur den Daumen des ausgestreckten Armes abwechselnd mit dem linken oder rechten Auge anzusehen. Beim Augenwechsel „springt“ der Daumen vor dem Hintergrund hin und her, ▶

Literaturhinweise

Physik der Sterne und der Sonne. Von Helmut Scheffler und Hans Elsässer. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1990.

Stellar Structure and Evolution: Deductions from Hipparcos. Von Yveline Lebreton in: Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Bd. 38, S. 35, 2000.

Globular Cluster Distance Determinations. Von Brian C. Chaboyer in: Post-Hipparcos Cosmic Candles. Hrsg. von A. Heck und F. Caputo, Kluwer, 1999.

Stars. Von B. Kaler, W. H. Freeman, 1998.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft“.*

R. MICHAEL RICH, KENNETH J. MIGHELL UND JAMES D. NEILL, COLUMBIA UNIVERSITY, WENDY L. FREEDMAN, CARNEGIE OBSERVATORIES, UND NASA



nur weil man ihn mal von rechts, mal von links anschaut. Wie man sich selbst leicht davon überzeugen kann, zeigen nähere Objekte eine größere Parallaxe als ferne. Diese Größe ist also ein Maß für die Entfernung.

Um die Parallaxe von Sternen zu messen, beobachten Astronomen deren scheinbare Positionsverschiebung am Himmel im Verlauf eines Jahres. Denn bedingt durch den Lauf der Erde um die Sonne verschieben sich nahe Sterne vor dem Hintergrund fernerer Sterne um einen gewissen Winkel.

Der Durchmesser der Erdbahn – seinerseits mit den Parallaxen der Planeten im Sonnensystem ermittelt – geteilt durch die in Bogensekunden ausgedrückte Parallaxe liefert die Entfernung zu dem betreffenden Stern. Per Definition entspricht eine Parallaxe von einer Bogensekunde einer Entfernung von einem Parsec (das 3,26 Lichtjahren entspricht). Teleskope auf dem Erdboden können gerade noch eine Parallaxe von 0,01 Bogensekunden auflösen, und so Entfernungen von 100 Parsec mit etwa zehn Prozent Genauigkeit bestimmen.

Die Entfernungen im Milchstraßensystem sind allerdings um ein Vielfaches größer. Um die Parallaxenmethode auch auf größere Distanzen ausdehnen zu

*Der Kanadier **Brian C. Chaboyer** ist seit seinem vierten Lebensjahr, als er im Fernsehen die Apollo-11-Mondlandung sah, vom Weltall fasziniert. Er promovierte an der Yale-Universität und ist heute Professor am Fachbereich Physik des Dartmouth College in Hanover (New Hampshire) sowie Wissenschaftlicher Leiter der Nasa Space Interferometry Mission.*

können, startete die Europäische Weltraumbehörde Esa 1989 den Astrometrie-Satelliten Hipparcos, der mit einem Auflösungsvermögen von 0,001 Bogensekunden den zugänglichen Entfernungsbereich um den Faktor 10 vergrößerte (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 42).

Lösung der Alterskrise

Doch selbst das reichte noch nicht, um etwa die Distanz zu dem uns nächsten Kugelsternhaufen zu bestimmen, der schätzungsweise rund 2000 Parsec entfernt liegt. Hipparcos gelang es immerhin, den Abstand einiger näher gelegener metallarmer Sterne zu messen, die jenen in Kugelsternhaufen ähneln. Unter der Annahme, dass diese Sterne dieselbe Leuchtkraft aufweisen wie Sterne derselben Farbe in Kugelhaufen, konnten die Astronomen die Entfernungen zu den Kugelsternhaufen präziser ermitteln als jemals zuvor.

Das Ergebnis überraschte: Kugelsternhaufen sind rund zehn Prozent weiter von uns entfernt als zuvor angenommen. Daher müssen ihre Sterne eine höhere Leuchtkraft haben und somit auch jünger sein als gedacht. Noch werden diese Resultate kontrovers diskutiert. Mögliche Fehlerquellen könnten etwa in den Modellen zur Sternentwicklung verborgen sein; auch ist die „kosmische Entfernungsleiter“ noch nicht endgültig festgelegt.

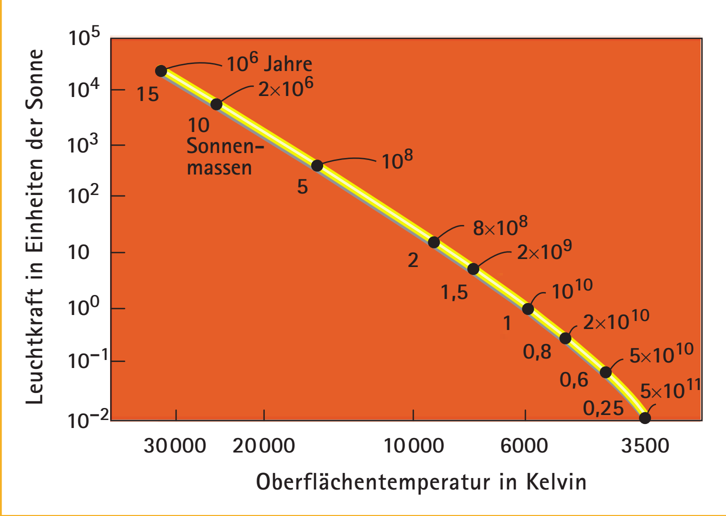
Astronomen greifen deshalb auch zu anderen Methoden der Entfernungsbestimmung. Eines dieser Verfahren basiert auf der Bewegung einer großen Zahl von Sternen in einem Kugelhaufen. Für jeden Stern hat die Bewegung zwei Komponenten: die radiale Bewegung in Blickrichtung und die transversale Bewegung senkrecht dazu. Diese Komponenten lassen sich unabhängig voneinander messen: Die Radialgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Spektrum des Sterns durch den Doppler-Effekt, die Transversalgeschwindigkeit aus Direktaufnahmen der Sterne zu verschiedenen Zeitpunkten.

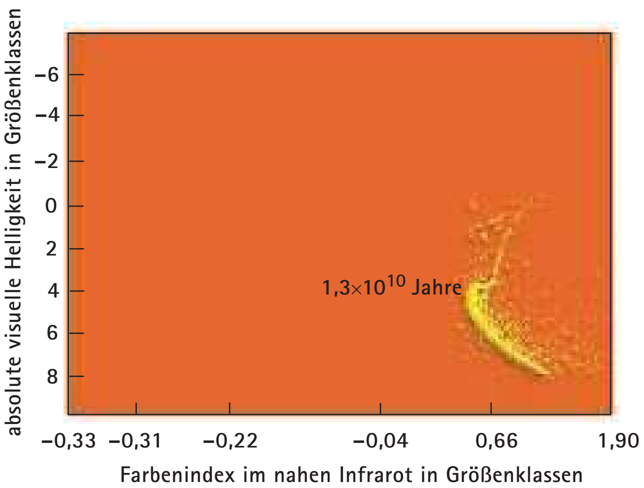
Während sich die Radialgeschwindigkeit absolut messen lässt, hängt die

Ein Knick verrät das Alter des Sternhaufens

Die Astronomen tragen die Zustandsgrößen Leuchtkraft und Oberflächentemperatur von Sternen (oder die Beobachtungsgrößen Helligkeit und Farbe bzw. Farbenindex) in einem Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) auf, um mehr über die Systematik der Sternentwicklung zu erfahren. Jeder Stern wird in dieser Grafik durch einen Punkt repräsentiert.

Alle Sterne, die wie die Sonne Wasserstoff verbrennen, liegen im HRD auf einer fast geraden Linie, der so genannten Hauptreihe (Grafik links). Ein Stern leuchtet umso kräftiger und ist umso heißer, je mehr Masse er hat. Ist der Wasserstoff aufgebraucht, bläht sich der Stern zum Roten Riesen auf; seine Leuchtkraft steigt, während seine Oberflächentemperatur abnimmt. Dadurch liegt er nun rechts oberhalb der Hauptreihe. Die Mitglieder des Kugelsternhaufens NGC 6052 liegen zum Teil noch auf der Hauptreihe, zum Teil haben sie diese bereits verlassen. Dadurch bildet sich im HRD ein Knick aus (Grafik rechts). Die massereichsten Sterne, die noch auf der Hauptreihe liegen, markieren das Alter des Haufens.





AARON FIRTH



TRAVIS A. RECTOR, BRENDA WOLPA UND GEORGE H. JACOBY, NATIONAL OPTICAL ASTRONOMY OBSERVATORIES

Die Große Molekülwolke Orion A hat neue Sterne hervorgebracht, die Gasjets aussenden, Stoßwellen auslösen und den umgebenden Staub erleuchten.

Transversalgeschwindigkeit von der Entfernung des Sterns ab. Eine physikalische Beziehung, die beide Größen miteinander verknüpft, vermag demnach die Entfernung zu liefern. Ein bestimmter Einzelstern kann zwar beliebige Werte der Radial- und Transversalgeschwindigkeit haben. Doch für die abertausenden Sterne eines Kugelhaufens, deren Bewegungsrichtungen statistisch verteilt sind, müssen die Mittelwerte der Radial- und der Transversalgeschwindigkeit gleich groß sein. Diesen mathematischen Zusammenhang haben die Astronomen genutzt, um die Entfernungen von Kugelhaufen abzuschätzen.

Die Ergebnisse legen nahe, dass Hipparcos etwas zu große Entfernungen geliefert hat. Der derzeit beste Wert für das Alter der ältesten Kugelsternhaufen liegt nun bei 13 Milliarden Jahren – mit einer Unsicherheit von 1,5 Milliarden Jahren. Diese korrigierte Altersschätzung verträgt sich aber sehr gut mit dem Alter des Universums, wie es den jüngsten Messungen der kosmischen Expansionsgeschwindigkeit entspricht. Erstmals seit fünfzig Jahren stimmen die Kosmologen mit den Sternphysikern überein.

Obwohl die Altersbestimmung von Kugelhaufen die derzeit wichtigste Methode zur Bestimmung des Alters des Milchstraßensystems ist, gibt es noch andere Verfahren, die vergleichbare Werte liefern. Kürzlich setzten Roger Cayrel von der Pariser Sternwarte und seine Mitarbeiter radiometrische Methoden ein, wie sie auch in der Archäologie oder Geologie benutzt werden. Zum ersten Mal konnten die Forscher in einem anderen Stern als der Sonne die Häufigkeit von Uran und weiterer schwerer Elemente bestimmen. Sie ermittelten, dass der Stern CS 31082-001, welcher der Population II angehört, weit weniger Metalle enthält als die Sonne. Alle Häufigkeiten betragen nur 12 Prozent der entsprechenden solaren Werte – nur die radioaktiven Isotope Thorium-232 und Uran-238 sind in noch geringeren Mengen vorhanden.

Unter der Annahme, dass auch diese beiden Atomsorten bei der Entstehung des Sterns eine Häufigkeit von 12 Prozent der solaren Werte hatten und seitdem allmählich zerfielen, errechnet sich für diesen Stern ein Alter von 12,5 ± 3 Milliarden Jahren. Diese erstmalige Anwendung der radiometrischen Methode auf die Datierung eines fernen Sterns lässt erwarten, dass sie künftig noch genauere Ergebnisse liefern wird als der Weg über die Kugelsternhaufen.

Gleichwohl wird auch dieses Verfahren noch weiter entwickelt: Neue Großteleskope wie das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte in Chile sollen bald bessere Werte für die chemische Zusammensetzung von Sternatmosphären liefern. Künftige Astrometrie-Satelliten wie die Gaia-Mission der Esa, die Space Interferometry Mission der Nasa oder der deutsche Satellit Diva werden eine weit bessere Auflösung haben als ihr Vorgänger Hipparcos. Damit werden in einem Jahrzehnt die Parallaxen der Kugelsternhaufen direkt bestimmt werden können. Die kosmologische Alterskrise, welche die Astronomen Jahrzehnte so sehr in Unruhe versetzt hat, wird sich dann wohl endgültig zu den Akten legen lassen.

Das Geheimnis der Mumien

Nach mehr als zwei Jahrtausenden geben geo- und petrochemische Analysemethoden erstmals detailliert Aufschluss über die Techniken und Substanzen, mit denen im alten Ägypten Leichname konserviert wurden.

Von Jacques Connan, André Macke und Christiane Macke-Ribet

Zu Beginn der Neuzeit war in Europa ein besonders abstruser Kannibalismus populär. Ausgerechnet Paracelsus (1493–1541), ein Wegbereiter der modernen Medizin, hatte dazu angestiftet: Als Arznei gegen allerlei Gebresten wie Epilepsie, Herzattacken, Übelkeit, Vergiftungen, Paralyse, Tuberkulose oder Blutergüsse empfahlen er und dann auch andere Doktoren staubfein zermahlene altägyptische Mumien.

Prominentester Gegner der makabren Praxis wurde der französische Hofchirurg Ambroise Paré (1510–1590) – allerdings nicht aus ethischen Gründen, sondern der Nebenwirkungen wegen. Sie verursache, schrieb er, „Herz- und Magenschmerzen, Erbrechen sowie Gestank aus dem Munde“. Trotzdem war die Nachfrage so rege, dass geschäftstüchtige Gauner sogar frische Leichen raubten, trockneten und pulverisierten. In der deutschen Apothekersprache blieb der Begriff Mumie bis ins 19. Jahrhundert gebräuchlich, wenngleich damit meist nur mehr eine Art Erdpech oder eine harzige Masse bezeichnet wurde, die angeblich aus Mumien geflossen war, nachdem man sie der Sonne ausgesetzt hatte.

Schmählicher konnte die Würde von Toten schwerlich verletzt werden. Denn nach den Jenseitsvorstellungen im Ägypten des Altertums war die spirituelle Existenz von Gestorbenen unbedingt auf ihren Körper angewiesen: Eine Seele – der Ka – verharrte nach dem Hinscheiden in dem Leichnam, während eine dynamische zweite – der als Vogel dargestellte Ba – die lebenden Angehörigen zu besuchen vermochte und die Sonne auf der nächtlichen Reise durch die Unterwelt begleitete; danach aber musste sie ihren Leib wieder auffinden und erkennen können.

Deshalb hatten Priester schon früh im Alten Reich (2660–2160 vor Christus), als Cheops, Chephren und Mykerinos sich die Pyramiden von Giseh als Ruhestätten für die Ewigkeit errichten ließen, raffinierte Konservierungstechniken entwickelt. Wie in keiner anderen



frühen Hochkultur zielte in Ägypten das Bestattungsritual darauf ab, die Verwesung zu verhindern – zunächst wohl nur bei den als gottgleich angesehenen Pharaonen und ihren Familienmitgliedern sowie bei den höchsten Beamten, deren Sippen sich den Aufwand leisten konnten, dann aber auch bei den gemeinen Sterblichen: Es entwickelte sich ein florierendes Gewerbe, das in speziellen Werkstätten – genannt „Per-nefer", Haus der Mumifizierung, oder „Wabet", Haus der Reinigung – ausgeübt wurde.

Eine rätselhafte Kunst

Der griechische Geschichtsschreiber Herodot (um 490 bis um 425 vor Christus) hat das Land am Nil bis zum ersten Katarakt (beim heutigen Assuan) bereist und, vielleicht aus eigener Anschauung, die damals angewandten Methoden zur Mumifizierung geschildert (siehe Kasten auf Seite 38). Seine Beschreibung kann als zuverlässig gelten, weil sie mit der des gleichfalls griechischen Historikers Diodorus Siculus weitgehend übereinstimmt, der in den Jahren 60 bis 57 vor Christus Ägypten durchstreifte, kurz bevor es römische Provinz wurde.

Allerdings sind diese antiken Dokumente zu knapp gehalten, als dass sie das heutige wissenschaftliche Interesse befriedigen könnten. Wie gingen die Priester bei der Balsamierung im Einzelnen vor? Mit welchen Substanzen erreichten sie, dass sich die Mumien über Jahrtausende erhielten? Wie schafften sie es, oft ein lebensnahes Aussehen zu bewahren?

Weil die künstliche Mumifizierung im Laufe der Zeit offenbar teils verfeinert, teils vereinfacht wurde, ist es nicht leicht, sie zu rekonstruieren. Autopsien von ägyptischen Mumien, die gelegentlich im 19. Jahrhundert vorgenommen wurden, zielten vor allem auf medizinische Befunde. Späteren umfassenderen Forschungen stand der wachsende Respekt vor diesen Artefakten entgegen. So durften der französische Ägyptologe Gaston Maspero 1889 und der englische Anatom Graftin Elliot Smith 1912 die mittlerweile im Kairoer Ägyptischen Museum angelegte große Mumiensammlung zwar oberflächlich studieren, aber nicht die manche Leiber noch ganz umhüllende Bandagierung lösen und keinerlei Probenmaterial entnehmen.

Erst von 1966 an gab es im Wortsinne erhellende Aufschlüsse über diese Kollektion: Experten aus den USA und Kanada war es gestattet worden, zusammen mit Kollegen von der Universität Alexandria und der Ägyptischen Antikenverwaltung Röntgenaufnahmen zunächst der Schädel und nach den guten Ergebnissen auch der ganzen Körper anzufertigen. Unter anderem erwies sich dabei, dass in einem Bindenbündel aus dem Sarkophag der hochrangigen Priesterin Makare nicht eine im Kindesalter gestorbene Prinzessin steckte, wie Archäologen vermutet hatten, sondern ein mumifizierter Pavian, Inkarnation des Götterboten Thot.

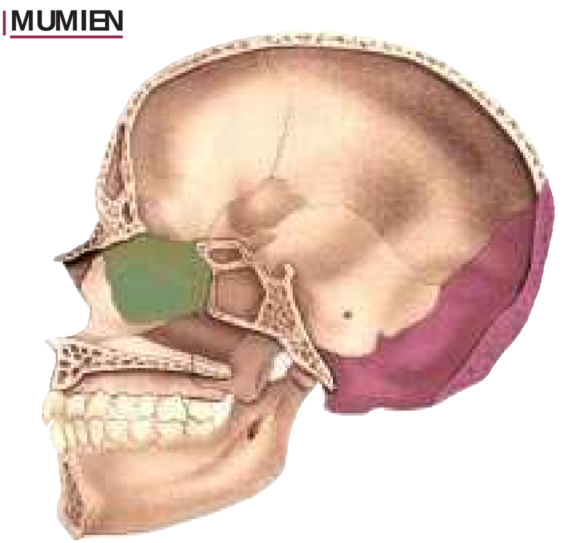
Inzwischen sind die analytischen Verfahren so subtil, dass wir jetzt durch die systematische Untersuchung einer großen Zahl von Mumien aus verschiedenen Epochen einige der offenen Fragen zu klären vermochten. Insbesondere standen uns dafür 341 vollständig oder teilweise erhaltene Mumien aus der Nekropole im Tal der Königinnen zur Verfügung. In dieser ausgedehnten Begräbnisstätte westlich des Nils gegenüber der zeitweiligen Reichshauptstadt Theben, beim heutigen Luxor, waren Königinnen und Prinzen der 19. und 20. Dynastie, später auch andere Personen beigesetzt worden. Bislang sind dort die Überreste von 1100 Menschen entdeckt worden; die Ausgrabungen leitete Christian Leblanc, ein Mitglied der französischen Archäologengruppe in West-Theben.

Untersuchen konnten wir vier fragmentarische Mumien von Mitgliedern des Königshauses aus dem Neuen Reich (1552–1070 vor Christus), 30 Mumien von Tempelbediensteten und Angehörigen des Hofstaats wie Priestern, Gärtnern, Parfümeuren und Sängerinnen aus ▶

Der Papyrus aus der Grabkammer des Bakenmut, eines Priesters aus der 21. oder 22. Dynastie (959–909 vor Christus), ist ein Exemplar des altägyptischen Totenbuches. Diese illustrierte Spruchsammlung sollte den Verstorbenen helfen, die Fährnisse im Jenseits zu überwinden. Die vier schwarzen Körper links in diesem Ausschnitt könnten Leichen sein, die gerade mumifiziert werden, denn sie scheinen in einem Becken mit Balsamierungsflüssigkeit zu schwimmen. Schwarz war die Farbe des Osiris, des Gottes der Unterwelt, der rechts mit der mitra-artigen Krone Oberägyptens dargestellt ist.

RMN – M. CHUZEVILLE









ANDRÉ MACKE

Das Siebbein zwischen Nasen- und Augenhöhle (links in Grün) wurde vor der Balsamierung meist durchbohrt, damit sich das Gehirn entfernen ließ. Blieb dieses im Schädel, zersetzte es sich oder vertrocknete zu einer schrumpeligen Masse in der hinteren Schädelgrube (links in Rot). Wie das Foto (Mitte) und die Röntgenaufnahme (rechts) dokumentieren, befindet sich im Hinterkopf einiger Mumien aber auch schwarze Balsamierungsmasse. Sie wurde standardmäßig in den Brustkorb eingefüllt und drang von dort manchmal durch das Hinterhauptsloch in den Schädel.

der Dritten Zwischenzeit und aus der Spätzeit (1070 – 332 vor Christus) sowie 307 Mumien aus der römischen Zeit (30 vor bis 395 nach Christus), als in der Gegend mehrere Dörfer öffentliche Friedhöfe anlegten. Für chemische Analysen haben wir überdies Proben von Mumien aus Museumssammlungen entnommen.

Betrachten wir nun die einzelnen Schritte der Mumifizierung in der Reihenfolge, wie Herodot sie aufgeführt hat. Demnach begann die Prozedur mit der Entfernung des Gehirns. Sie wurde allerdings nicht immer ausgeführt, da der Kopf ohne diesen Eingriff ebenso gut erhalten blieb. Soweit sich das Nervengewebe bald nach dem Tode zersetzte, sickerte die Flüssigkeit offenbar durch das Hinterhauptsloch aus; jedenfalls haben wir auch in den meisten Schädeln ohne künstliche Öffnung nichts mehr davon gefunden. Nur in einigen wenigen Fällen war das Gehirn eingetrocknet und bildete eine verschrumpelte Masse in der hinteren Schädelgrube. Wahrscheinlich entwickelte sich die Hirnextraktion jedoch allmählich zum Ritual, denn sie wurde immer öfter vorgenommen: Ihre Häufigkeit stieg von 7 Prozent der Mumien im Mittleren Reich auf 40 Prozent im Neuen Reich und schließlich 70 Prozent in der römischen Zeit.

Die Extraktion des Gehirns

Die an den Schädelknochen festgestellten Zerstörungen lassen erkennen, wie die Balsamierer vorgingen: Im Allgemeinen führten sie ein Messer oder eine scharfe Sonde in ein Nasenloch ein, erweiterten es durch Schaben und Drehen des Instruments und durchbohrten schließlich das Siebbein zwischen dem Dach der Nasenhöhle und den Augenhöhlen. Die so geschaffene Öffnung war allerdings zu klein, um das gesamte Gehirn mit einem Haken zerteilen und stückweise herausziehen zu können. Wie schon Herodot angab, wurden die Reste mit einer womöglich Gewebe lösenden Infusion herausgespült. In Ausnahmefällen verschafften sich Balsamierer auch einen Zugang durch die linke Augenhöhle oder das Hinterhauptsloch.

Etliche Schädel enthalten eine dicke Schicht verfestigter Balsamierungsmasse, die sich bis in Hals und Brustkorb ausdehnt. Früher meinte man, dass sie Kopf und Körper dauerhafter verbinden sollte. Aber nach unseren Befunden dürfte das kaum je der Fall gewesen sein: Bei 289 Schädeln in so gutem Zustand, dass sie eine Auswertung erlaubten, fand sich lediglich in 13 eine solche Masse; und nur zwei wiesen Spuren davon um das ins Siebbein gebohrte Loch auf, was darauf hinweisen könnte, dass man die Substanz absichtlich – etwa mit einem Trichter – in den Schädel eingefüllt hatte. Bei den elf übrigen war offenbar Balsamierungsflüssigkeit aus dem Brustkorb, in den sie nach dem Entfernen der inneren Organe gegossen wurde, über Rückenmarkskanal und Hinterhauptsloch in den Schädel eingedrungen; denn die Schicht in der hinteren Schädelgrube bildete mit der im rückwärtigen Brustraum eine ebene Fläche, musste sich also abgesetzt und verfestigt haben, als der Körper ausgestreckt auf dem Rücken lag. Bei zweien dieser elf Schädel war zudem das Siebbein intakt, sodass nichts durch die Nase in die Hirnkapsel eingeflößt werden konnte. Für einen zufälligen Effekt spricht ferner, dass bei anderen Mumien das Balsamierungspräparat aus der Brusthöhle bis in das Unterhautgewebe des Nackens gesickert war.

Auch die strahlenundurchlässigen Fremdstoffe in der hinteren Schädelgrube, die mitunter auf Röntgenaufnahmen zu erkennen sind, wurden oft als zusätzliche Befestigung von Kopf und Rumpf interpretiert. Nach unseren Untersuchungen dürfte es sich dabei aber gleichfalls entweder um erstarrte Balsamierungssubstanzen handeln, die aus dem Brustraum eingedrungen waren, oder um vertrocknetes Hirngewebe.

Das Ausräumen von Bauch- und Brusthöhle

Der zweite Schritt der Mumifizierung bestand darin, Bauch- und Brusthöhle zu leeren. Von den 341 Mumien, die uns zur Verfügung standen, konnten wir 224 daraufhin untersuchen. In mehr als drei Vierteln der Fälle waren die inneren Organe entnommen worden.

Der dafür erforderliche Schnitt war jeweils auf der linken Körperseite angebracht, und zwar so, dass er nur sichtbar wurde, wenn man den linken Arm des Leichnams anhob: entweder schräg in der linken Darmbeingrube, senkrecht oberhalb dieser Stelle oder noch etwas höher. In den ersten beiden Fällen musste der Balsamierer die Bauchdecke mit einem Spreizinstrument anheben, um mit einer Hand auch das Zwerchfell durchtrennen und in den Brustraum gelangen zu können. Bei einem Schnitt bis in Höhe des Nabels dürfte der Eingriff einfacher gewesen sein; lag die Leiche auf einem hohen Tisch, konnte der Operateur nach dem Ausräumen des Gedärms leichter an Magen und Leber sowie weiter an die

Lungen herankommen. Die Schnittführung hing offenbar nur von der Höhe des Präparationstisches und den Gewohnheiten des Balsamierers ab, da sich die drei unterschiedlich lokalisierten Öffnungen bei Mumien aus jeder Epoche finden.

Herodot berichtete, dass je nach dem vereinbarten Preis drei mehr oder minder sorgfältige Verfahren angewandt wurden: die radikale operative Entfernung aller inneren Organe, die rektale Infusion einer zumindest den Verdauungstrakt zersetzenden Flüssigkeit, wozu wohl eine Art Klistierspritze diente, und die Behandlung der im Leib belassenen Eingeweide mit einem anscheinend konservierenden Öl. Unsere Befunde bestätigen diese Unterscheidung weitgehend. Bei rund achtzig Prozent der untersuchten Mumien waren die Organe des Bauch- und Brustraumes entnommen worden, wenn auch in einigen Fällen nur zum Teil. Noch im Neuen Reich hatten die Balsamierer allerdings das Herz an seinem Platz gelassen, denn die Ägypter betrachteten es – und nicht das Gehirn – als Sitz des Geistes und der Emotionen, an dem zugleich alle guten und bösen Taten während des Lebens für das göttliche Totengericht registriert wurden; erst in der Spätzeit und während der römischen Herrschaft entfernte man häufig auch dieses Organ.

Die Eingeweide wurden gewaschen und entwässert, dann mit wohlriechenden und harzigen Substanzen behandelt und schließlich separat eingewickelt. Zur Beisetzung mit der Mumie legte man sie in vier Krüge. Diese Kanopen waren im Neuen Reich jeweils einer Gottheit, den Söhnen des Horus, zugeordnet; entsprechend wurden die Deckel gekennzeichnet: Der menschenköpfige Amset schützte Magen und Gedärm, der schakalköpfige Duatmutef die Lunge und – falls es entnommen war – das Herz, der falkenköpfige Kebehsenuf Leber und Galle und der affenköpfige Hapi die übrigen kleineren Organe. In der 21. Dynastie, also zu Beginn der Dritten Zwischenzeit, wurden die Organpakete nicht mehr separat in Kanopen beigesetzt, sondern wieder in den Körper getan, jedes zusammen mit einer Wachsfigur des zuständigen Horus-Sohns; noch später, von der 26. Dynastie an, legte man sie einfach der Mumie zwischen die Beine.

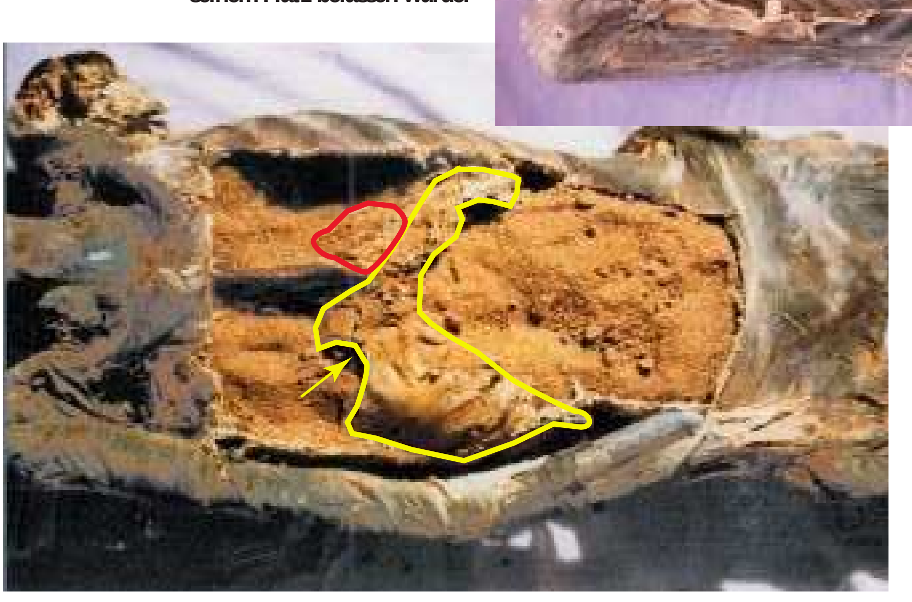
Die Körperhöhlen des präparierten Leichnams füllten die Balsamierer sodann mit Säckchen, die ein Mineraliengemisch enthielten. Zwar wurden diese Säckchen normalerweise vor der nächsten Prozedur wieder entfernt; aber es fanden sich noch einige an schwer zugänglichen Stellen einer Mumie der Spätzeit und zweier der römischen Periode, die wahrscheinlich vergessen worden waren. So konnten wir den Inhalt analysieren. Er bestand zu über dreißig Prozent aus Sand; die wirksamen Substanzen waren Calciumsulfat in Form von Alabaster, der durchscheinenden Gipsart, sowie natürliches Natron, ein Gemenge von Natriumchlorid (Kochsalz), Natriumcarbonat (Soda), Natriumhydrogencarbonat – das eigentliche Natron – und Natriumsulfat (Glaubersalz).

Die Zusammensetzung des zur Mumifizierung verwendeten Natrons war je nach Herkunft verschieden; aber es entwässerte auf jeden Fall den Leichnam gründlich – mitunter dermaßen, dass empfindliche Gewebe versprödeten und zerfielen. Dazu trug bei, dass sich aus dem Körperfett mit der Natron- und der Sodalauge Seife bildete, die dann ausgespült wurde.

Wenn die Balsamierer die inneren Organe nicht entnommen hatten, sorgten sie dafür, dass die sich durch Zersetzung bildende Flüssigkeit aussickerte, indem sie eine mehrere Kilogramm schwere Masse aus Harzen, Teeren und Wachs auf den Unterbauch legten. Wir haben ein solches Präparat direkt auf der Haut unter den Leichentüchern entdeckt. Al- ▶

Bei einer Mumie aus der römischen Zeit ist der Bauchraum mit schwarzer Balsamierungsmasse gefüllt, die einige Eingeweideteile enthält (rechts). Ein Stoffknäuel verschließt die Öffnung, die der Balsamierer auf der linken Körperseite angebracht hatte, um die inneren Organe zu entnehmen. Die dreieckige graue Masse zwischen den Rippen ist das Herz, das gleichfalls an seinem Platz belassen wurde.

ANDRÉ MACKE



Die Bauchhöhle einer Mumie aus der Spätzeit (1070 – 332 vor Christus; links) ist mit Sägespänen und Stoff ausgestopft. Der Balsamierer hatte das Zwerchfell (gelb umrandet) durchtrennt (gelber Pfeil), um die Lungen zu entfernen. Das Herz (rot umrandet) als vermeintlicher Sitz der Seele blieb dagegen im Körper.

lerdings fanden wir bei den von uns untersuchten Mumien keine Anzeichen der von Herodot erwähnten Methode, die Bauchorgane mit ätzenden Substanzen aufzulösen.

Die Dauer der Mumifizierung

Über die Frist, die ein Leichnam den entwässernden Salzen und weiteren Substanzen ausgesetzt war, enthalten die antiken Texte widersprüchliche Angaben. Herodot zufolge bedeckten die Balsamierer ihn „siebzig Tage lang mit Natron"; diese Zeitspanne hätte nicht überschritten werden dürfen. Diodorus schrieb: „Schließlich behandeln sie den ganzen Körper, nachdem sie ihn gewaschen haben, zunächst sorgfältig mit Zedernöl und anderen Dingen mehr als dreißig Tage und dann mit Myrrhe und Zimt und Gewürzen." In der Bibel wiederum (1. Mose 50, Verse 2 und 3) heißt es: „Und Joseph befahl seinen Knechten, den Ärzten, dass sie seinen Vater salbten. Und die Ärzte salbten Israel" (also Jakob), „bis dass vierzig Tage um waren; denn so lange währen die Salbetage. Und die Ägypter beweinten ihn siebzig Tage."

Bei unseren Untersuchungen an den Mumien stützten wir uns auf Erkenntnisse aus der Gerichtsmedizin. Demnach werden Leichen von verschiedenen Insekten in acht aufeinander folgenden Phasen befallen. Tatsächlich entdeckten wir Relikte von zwei Arten, die in Balsamierungsharzen klebten: Puppenhäute, aus denen Zweiflügler der Gattung *Calliphora* (Blaue Schmeißfliege) geschlüpft waren, und kleine Speckkäfer der Gattung *Dermestes*, deren Larven vor allem organische fetthaltige Stoffe fressen.

Die Schmeißfliegen sind typische Insekten der ersten Phase. Sie kommen innerhalb von 24 Stunden nach dem Tode zu der Leiche. Aufschlussreich ist der Befund, dass alle gefundenen Puppenhüllen leer waren: Die Zweiflügler hatten demnach genügend Zeit für die komplette Entwicklung vom abgelegten Ei über die Larve und das Puppenstadium bis zum ausgewachsenen Tier der Folgegeneration – im Schnitt sind das vierzig Tage.

Spuren von Insekten der zweiten Phase, die erst durch Verwesung der inneren Organe angelockt werden, fehlten bei den von uns untersuchten Mumien, da die Eingeweide bald nach dem Tode entfernt wurden oder schon entwässert waren. Dafür fanden wir aasfressende Speckkäfer der Art *Dermestes frischi*, Vertreter der dritten Phase, die von der Haut und den eintrocknenden Muskeln der Toten angezogen wurden. Wenn sie erschienen, wusste der Balsamierer, dass er zur nächsten Stufe der Mumifizierung übergehen musste: Er entfernte das Natron, wusch den Leichnam, wodurch er auch die meisten Insekten beseitigte, und ging zur eigentlichen Balsamierung über.

Unseren Befunden zufolge blieb also der Körper während der gesamten Metamorphose von Blauen Schmeißfliegen unter Einwirkung des Natrons, das heißt im Durchschnitt vierzig Tage lang. Das Vorhandensein der Speckkäfer weist dagegen nur darauf hin, dass der Leichnam vor der obligaten Waschung ausgetrocknet war, aber nicht, wie lange es dauerte, diesen Zustand herbeizuführen. Die von Herodot erwähnten siebzig Tage wurden wahrscheinlich für alle Arbeitsgänge bis zur Bestattung benötigt. Diese Spanne hatte auch wohl religiöse Bedeutung, denn sie entspricht den sieben Dekaden des ägyptischen Kalenders, die mit Tod und Wiedergeburt des Gottes Osiris in Zusammenhang standen.

Die Einbalsamierung

Das weitgehend entwässerte Gewebe ähnelte zunächst dem einer natürlichen Mumie. Auch in heißem Wüstensand flach verscharrte Leichen können unter günstigen Umständen ausdorren und eine Weile erhalten bleiben. Diese Beobachtung hatte in Ägypten wahrscheinlich schon in vorgeschichtlicher Zeit Vorstellungen von einem Leben nach dem Tode begünstigt. Umso erschreckender dürfte darum gewesen sein, dass gerade die Herrscher und Vornehmen, die nach der Reichseinigung Mitte des dritten vorchristlichen Jahrtausends erstmals in tief ausgehobenen Kammergräbern beigesetzt wurden, rasch verwesten. Das war wohl überhaupt der Anlass für die Entwicklung der künstlichen Mumifizierung.

Um den durch das Natron spröden Weichteilen eine lederartige Konsistenz und damit wirklich Dauerhaftigkeit zu verleihen, behandelten die Balsamierer

Die Mumifizierung nach Herodot

Es gibt eine Gruppe von Menschen, die diese Kunst [das Einbalsamieren] ausüben und zu ihrem Beruf machen. Wenn man einen Toten zu ihnen bringt, zeigen sie den Kunden kleine Holzmodelle von Leichen, die sorgfältig und naturgetreu bemalt sind. Sie sagen, das vollkommenste Modell stelle denjenigen dar, dessen Namen in diesem Zusammenhang auszusprechen eine Entweihung wäre [Osiris]. Als Nächstes zeigen sie das zweite Modell, das weniger teuer und weniger sorgfältig ausgeführt ist, und zuletzt das dritte, das preiswerteste. Dann bitten sie, das Verfahren zu wählen, das für den Verstorbenen angewandt werden soll. Die Familie vereinbart einen Preis und geht heim.

Die Balsamierer bleiben in ihrer Werkstatt. Bei der sorgfältigsten Art der Balsamierung gehen sie folgendermaßen vor: Zuerst holen sie einen Teil des Gehirns mit einem eisernen Haken durch die Nasenlöcher heraus; den Rest entfernen sie durch Infusion bestimmter Arzneien. Dann machen sie mit einer scharfen Klinge aus äthiopischem Stein [Obsidian] einen Einschnitt an der Seite, entfernen alle inneren Organe, reinigen den Bauchraum und waschen ihn erst mit Palmwein aus und dann mit zerriebenen wohlriechenden pflanzlichen Substanzen. Anschließend füllen sie den Bauch mit reiner zermahlener Myrrhe, mit Zimt und allen aromatischen Substanzen, die sie kennen, abgesehen vom Weihrauch. Danach nähen sie den Bauch wieder zu und salzen den Körper ein, indem sie ihn siebzig Tage lang mit Natron bedecken. Diese Zeitspanne darf nicht überschritten werden. Wenn die siebzig Tage vergangen sind, waschen sie den Körper und wickeln ihn vollständig mit Binden ein, die aus sehr feinem Leinenstoff geschnitten und mit Gummi bestrichen wurden, das die Ägypter normalerweise anstelle von Klebstoff verwenden. ...

Wenn eine Balsamierung zu einem mäßigen Preis gewünscht wird und man nicht zu viel ausgeben möchte, wird folgende Methode angewandt: Die Balsamierer füllen eine Klistierspritze mit Zedernöl und füllen den Bauch des Verstorbenen mit dieser Flüssigkeit, ohne ihn aufzuschneiden und ohne die inneren Organe zu entfernen. Nachdem sie das Öl durch den After eingespritzt und dafür gesorgt haben, dass es nicht wieder herausfließt, legen sie den Körper für die vorgeschriebene Anzahl von Tagen in Natron ein. Am letzten Tag lassen sie das Öl, das sie eingeflößt hatten, wieder aus dem Bauch herausfließen; diese Flüssigkeit ist so wirkungsvoll, dass sie die Gedärme und Eingeweide auflöst und mit herausspült. Das Natron löst seinerseits das Fleisch auf, und es verbleiben nur die Haut und die Knochen des Leichnams. Danach geben die Balsamierer den Körper zurück, ohne ihn weiter zu behandeln.

Die dritte Methode der Einbalsamierung, die für die Ärmsten angewandt wird, ist folgende: Man säubert die Eingeweide mit Rettichöl und salzt den Körper während der vorgeschriebenen siebzig Tage ein. Danach übergibt man ihn der Familie, die ihn mitnimmt.





Diese Mumien aus der römischen Zeit sind von Balsamierungssubstanzen unterschiedlicher Zusammensetzung schwarz beziehungsweise rot gefärbt. Für die Rezepturen gab es keine rituellen Vorschriften, weswegen sie unterschiedlich ausfallen konnten.

den Körper schließlich innen und außen mit einer schützenden, tief einwirkenden Substanz. Deren Zusammensetzung wandelte sich im Laufe der Zeit. Im Neuen Reich benutzte man eine Mischung, die der Haut ein rötliches Aussehen gab. Bei Mumien aus der Spätzeit findet man Färbungen von einem orangegetönten Weiß bis zu einem sehr dunklen Rot. Bei den meisten Mumien aus der römischen Zeit ist die Haut hingegen fast schwarz.

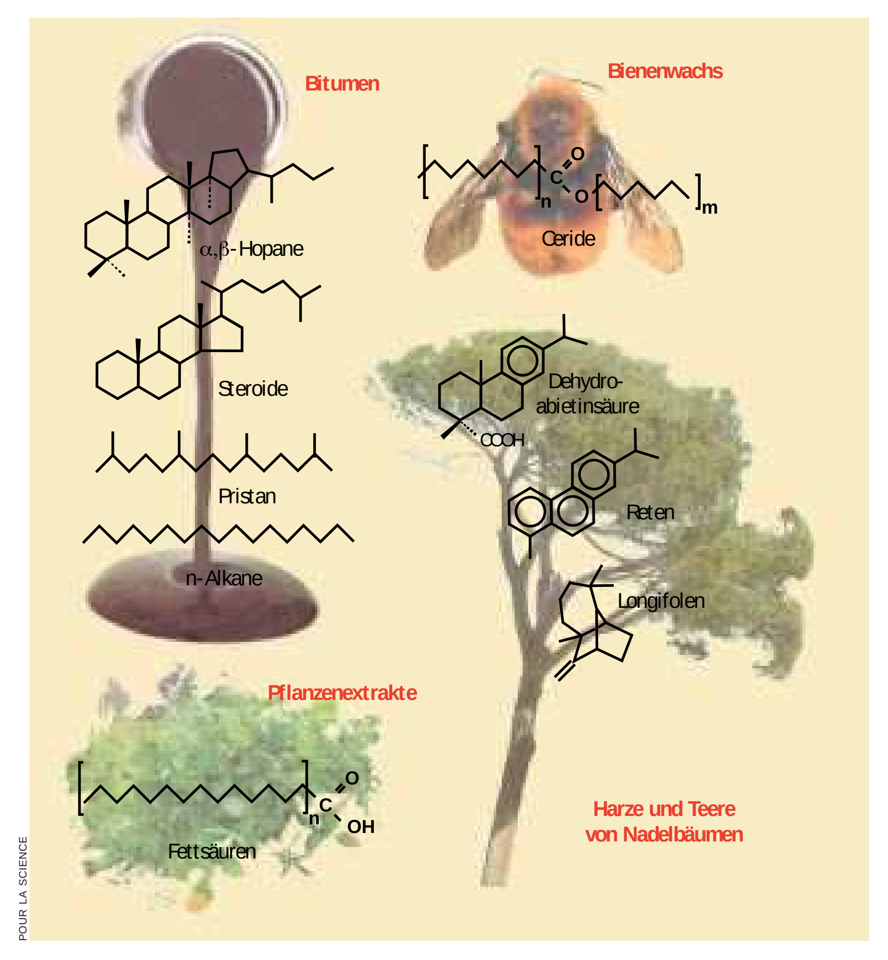
Unseren Untersuchungen zufolge ist jede Hautfalte mit der Masse bedeckt. Wir halten es darum für wahrscheinlich, dass der Körper gänzlich in heißen, flüssigen Balsam getaucht und nicht nur damit bestrichen oder übergossen wurde. Zwei antike Illustrationen stützen diese Hypothese: Auf einer Zeichnung im 126. Kapitel des Totenbuches – der Spruchsammlung, die Verstorbenen seit der 18. Dynastie in Form einer Papyrusrolle mit ins Grab gegeben wurde – sieht der Flammensee, der Strafort in der Unterwelt, wie ein von unten beheiztes Becken aus; und in einer Szene im Papyrus des Bakenmut schwimmen vier schwarze Leichen in einer flachen Wanne auf Ständern (Bild auf Seite 34/35).

Überschüssigen Balsam ließ man auf einem Holzbett abtropfen; dessen Spuren sind noch auf dem Rücken mancher Mumien zu erkennen. Dann wurde der Körper auf die rechte Seite gedreht, weil der Schnitt im Leib links angebracht war, und Konservierungsflüssigkeit in die Bauchhöhle gegossen. Die Temperatur des Balsams musste sorgsam kontrolliert werden: War er zu kühl, war er nicht flüssig genug, um in alle Hohlräume einzudringen; war er zu heiß, bestand die Gefahr, dass das Gewebe verkohlte. Wir haben Anzeichen für verschiedene Temperaturen zwischen diesen beiden Extremen gefunden: Eine dicke Balsamschicht war porös wie Bimsstein erstarrt und muss demnach so erhitzt gewesen sein, dass sie noch im Körper ausgaste; eine glasartige Masse deutet dagegen auf kühleren Balsam hin und eine teigige auf eine ziemlich niedrige Temperatur.

Sodann wurden die Brust- und die Bauchhöhle locker mit Stoffstücken und Sägespänen ausgestopft, damit der Körper seine menschliche Gestalt behielt. Bei den von uns untersuchten Mumien aus relativ später Zeit steckten in dieser Füllung auch Teile der Eingeweide, die in Balsam getränkt und zu etwa zehn Zentimeter langen Zylindern geformt waren. Mitunter fand sich nur eine solche Rolle, in anderen Fällen waren es mehrere – bis zu sechs. Lediglich ein knappes Drittel der Mumien enthielt vier; die im Neuen Reich beim Totenritual religiös bedeutsame Zahl der Organpakete – den vier Söhnen des Horus entsprechend – wurde also nicht mehr recht beachtet.

Den Schnitt in der Bauchdecke, früher grob vernäht und manchmal mit einem Siegel aus Wachs oder gar aus Gold geschützt, fanden wir in der Regel mit einem zusammengerollten Stück Leinen verschlossen. Bei hochrangigen Toten waren zudem die Backen gepolstert, und auf Röntgenaufnahmen sind unter den Lidern mitunter künstliche Augen zu erkennen. Schließlich wurde die Mumie bandagiert, wobei man erst die einzelnen Finger und Zehen, dann Hände und Arme, Füße und Beine sowie den Leib umwickelte; bei Männern sind gelegentlich die Geschlechtsorgane deutlich mit Binden modelliert.

Woraus bestanden nun die Balsamierungsstoffe? Noch heute herrscht ziemliche Unsicherheit darüber, und entsprechend ungenau sind oft die Angaben. Zum Beispiel schrieben Françoise Dunand und Roger Lichtenberg in ihrem 1998 erschienenen Buch „Les momies et la mort en Égypte“: „Man pflegte den Körper mit einer schwärzlichen Substanz zu bestreichen, die wie Pech glänzte ... und als ‚Bitumen‘ bezeichnet wird, wenngleich sie unterschiedliche chemische Zusammensetzungen haben kann.“ „Manche Sarkophage sind ebenfalls schwarz bemalt, aber es ist nicht sicher, ob mit der gleichen Substanz. ... Vielleicht handelt es sich um einen Anstrich, ▶



Zur Balsamierung von Mumien dienten komplexe Gemische aus Harzen von Nadelbäumen, Bitumen, Bienenwachs und pflanzlichen Extrakten. Die einzelnen Komponenten ließen sich durch Vergleich mit Analysen natürlicher Substanzen, die zur Herstellung von Konservierungsstoffen geeignet sind, genauer bestimmen.

der erst im Laufe der Zeit schwarz wird." „Manche halten die Substanz für Bitumen vom Toten Meer, andere für pflanzliche Produkte, deren schwarze Farbe auf chemische Umwandlungsprozesse zurückzuführen sei." Und in einem Sonderheft der Zeitschrift „Historia" vom April 1999 steht: „Die Körperhöhlen werden mit Leinentüchern balsamiert, die mit stark duftenden Harzen wie Myrrhe und Zimtöl getränkt sind."

Viele Ägyptologen berufen sich noch immer auf das Buch „Ancient Egyptian Materials and Industries" von John Harris und Alfred Lucas, das 1926 veröffentlicht, 1962 zuletzt aktualisiert und 1989 neu aufgelegt wurde. Aber den Autoren standen noch keine differenzierten Analyseverfahren zur Verfügung. Wir beschäftigen uns mit der chemischen Zusammensetzung von Balsamierungssubstanzen seit mehr als zehn Jahren. In dieser Zeit gelang es uns mit modernen Untersuchungsmethoden, die wichtigsten Zutaten der Konservierungsflüssigkeit zu ermitteln und so endlich von Spekulationen zu fundierten Einsichten zu gelangen.

Proben für unsere Analysen entnahmen wir zahlreichen Mumien aus dem Museum Guimet in Lyon, dem Roemer- und Pelizaeus-Museum in Hildesheim, dem Museum für Anthropologie und Völkerkunde in Turin und dem Polnischen Nationalmuseum in Warschau; Proben des Inhalts von Kanopen bekamen wir vom Kestner-Museum in Hannover. Zum Schluss untersuchten wir auch zwölf der schon erwähnten Mumien aus dem Tal der Königinnen. Die Ergebnisse sind für die Phase von der Dritten Zwischenzeit bis zur römischen Epoche repräsentativ; davor waren die Rezepturen der Balsamierungsstoffe wahrscheinlich anders.

Bienenwachs zur Balsamierung

Die von uns angewandten modernen Analysetechniken wurden für die organische Geochemie und die Petrochemie – unser Spezialgebiet – entwickelt. Die komplexen Stoffgemische trennten wir zunächst mit Methoden wie Extraktion und Ausfällung mit Hilfe von Lösungsmitteln sowie durch Flüssig- und Gas-Chromatographie; die verschiedenen Fraktionen klassifizierten wir dann mittels Massenspektrometrie. Außerdem untersuchten wir auf dieselbe Weise eine ziemlich große Gruppe von Naturstoffen, die uns zur Balsamherstellung geeignet schienen: vor allem Harze von Nadelbäumen wie Zeder, Pinie, Strandkiefer, Seekiefer, Tanne und Lärche, von der Terpentinpistazie (Terebinthe), vom Myrrhen- und vom Weihrauchstrauch, ferner Teere von Kiefern und Birken, die durch Pyrolyse des Holzes oder der Rinde gewonnen werden, sowie Bienenwachs und Erdpech (Bitumen) verschiedener Herkunft.

Indem wir die Spektren der Fraktionen unserer Mumien-Proben mit denen der natürlichen Substanzen verglichen, konnten wir nachweisen, dass die antiken Balsamierungsstoffe ebenso wie Harze und Teere von Nadelbäumen die Verbindungen Abietinsäure, Reten und Longifolen enthalten. Demnach waren diese Harze und Teere die Hauptbestandteile der meisten Balsame. Hingegen fanden wir keine Spur des häufig in Übersetzungen ägyptischer Texte erwähnten Terebinthenharzes von der griechischen Insel Chios. Die vermeintlichen Hinweise darauf sind wohl falsch interpretiert oder übersetzt worden; denn aus der rötlichen Rinde der Terebinthe (*Pistacia terebinthus)* wird das wohlriechende Chios-Terpentin gewonnen und kein Harz; dieses – der Mastix – stammt vielmehr aus dem zur selben Gattung der Sumachgewächse gehörenden Mastixstrauch (*Pistacia lentiscus)*. Womöglich bezeichnete man im Altertum mit dem lateinischen Begriff *terebinthus*, einem Fremdwort aus dem Griechischen, auch Nadelbaumharze. Diese hatten jedenfalls zwei Vorteile für die Balsamierer: Mit ihnen ließ sich der tote Körper gut erhalten, weswegen sie seit dem Alten Reich verwendet wurden, und sie waren preiswerter als andere Harze – zum Beispiel kosteten Myrrhe und Weihrauch etwa zehnmal so viel.

Außer den für Koniferen charakteristischen Verbindungen enthielten die von uns analysierten Balsamgemische Sterane, Pristan, Phytan und Hopane. Das sind gewissermaßen fossilisierte Moleküle, nämlich Produkte der langsamen Umwandlung abgelagerter Überreste von Lebewesen. Beispielsweise entstehen Hopane aus den Hopanoiden der Mikroorganismen, die dem Cholesterin im Gewebe der Tiere entsprechen. Die Anteile dieser Verbindungen gleichen denen der Ausgangsstoffe im Bitumen vom Toten Meer. Dieses Kohlenwasserstoffgemisch hatten

wir – wie auch Jürgen Rullkötter von der Universität Oldenburg und Arie Nissenbaum vom Weizmann-Institut in Rehovot (Israel) – schon 1989 in Proben aus Mumien chemisch nachgewiesen. Damit war zugleich ein Expertenstreit entschieden: Noch in der letzten Auflage von „Ancient Egyptian Materials and Industries“ hatten die Autoren versucht, alle Beweise für die Verwendung von Bitumen zur Balsamherstellung zu widerlegen. Dabei müssen sie freilich einschlägige antike Texte übersehen haben, in denen beispielsweise steht, dass Kleopatra VII. (69 – 30 vor Christus) auf die Dienste der Nabatäer verzichten wollte, die Bitumen vom Toten Meer exportierten, und dass diese sich rächten, indem sie die ägyptische Flotte im Hafen von Alexandria in Brand steckten.

Bitumen war mithin der zweite Hauptbestandteil der Balsamierungsstoffe. Sein Anteil betrug meist fünf bis zehn und in seltenen Fällen bis zu dreißig Prozent. Gewöhnlich stammte es vom Toten Meer, doch haben wir auch Anzeichen für andere Vorkommen gefunden: Hit im Irak, den Berg Zeit nahe der ägyptischen Küste des Roten Meeres, die Halbinsel Sinai und den Jemen. Verwendet wurde das teure, zumeist importierte Erdpech nicht nur seiner konservierenden Eigenschaften wegen, sondern weil Schwarz auch die Farbe des Osiris war, der nach seiner Ermordung wiederbelebt wurde und das Totenreich regierte. Die mythologischen Vorstellungen wurden mit der Zeit demokratischer: Erst gingen nur die verstorbenen Könige in die Gestalt des Gottes über, später alle, die das Totengericht bestanden. Eine schwarze Färbung der Mumien unterstützte diese symbolische Verwandlung, durch die die Verstorbenen wie Osiris ewig lebten.

Als dritte Gruppe von Verbindungen haben wir Ceride in den Mumien nachgewiesen. Sie basieren auf Fettsäuren im Bienenwachs. Dieses wurde vielleicht häufig benutzt, um die Balsammischung bei relativ geringer Temperatur flüssig zu halten und so ihr Vordringen in schwer zugängliche Hohlräume zu erleichtern. Außerdem schrieben die Ägypter dem Bienenwachs magische Kräfte zu.

Des Weiteren fanden wir Furan-Abkömmlinge, die in vielen Parfümen vorkommen und heute auch in Aromastoffen verwendet werden, sowie Sesquiterpene. Diese Kohlenwasserstoffe finden sich in Pflanzen; wir wissen aber noch nicht, von welchen Arten die in unseren Proben entdeckten Verbindungen stammen.

Schließlich galt es, die Herkunft geringer Beimengungen von Fetten zu klären. Manche Ägyptologen hatten vermutet, das seien Verunreinigungen durch das Körperfett der Leichen. Dagegen sprach unser Befund, dass Fettsäuren in Binden vorhanden sind, die nicht mit den Mumien in Berührung gekommen waren; zudem verwandelte die Behandlung mit Natron vor der Einbalsamierung das körpereigene Fett in Seife.

Die Mumie von Ramses II.

Medizinischen Papyri zufolge wurden im alten Ägypten zwar tierische Fette zur Herstellung vieler Heilmittel verwendet. In den Balsamproben waren jedoch hauptsächlich kurzkettige Fettsäuren mit sechs bis zehn Kohlenstoffatomen nachzuweisen, wie man sie in Pflanzen findet; und die längerkettigen mit 14 bis 18 Kohlenstoffatomen – vor allem Stearin- und Palmitinsäure – kommen sowohl in tierischen als auch in pflanzlichen Organismen vor. Ferner deuten die Ergebnisse einer Analyse der Kohlenstoffisotope C-12 und C-13, die sich in den Geweben von Pflanzen und Tieren in unterschiedlichem Maße anreichern, eher auf einen pflanzlichen Ursprung hin. Andererseits haben wir keinen Hinweis auf die Verwendung tierischer Fette gefunden; womöglich widerstrebte es den Ägyptern, damit Mumien zu behandeln, weil sie viele Tiere als heilig betrachteten.

Alles in allem ergaben unsere Untersuchungen, dass die Anteile der vier vorwiegenden Balsamzutaten – Harze und Teere von Nadelbäumen, Bitumen, Bienenwachs und pflanzliche Substanzen – beträchtlich variierten. Nicht jeder Bestandteil wurde stets in gleicher Menge verwendet. Weil die Rezepte nicht durch religiöse Vorschriften festgelegt waren, folgte wahrscheinlich jeder Balsamierer der Tradition seiner Werkstatt oder behalf sich mit dem, was gerade zur Verfügung stand.

Die ältesten von uns untersuchten Materialproben stammen allerdings erst aus der Dritten Zwischenzeit. Zuvor, im Mittleren und Neuen Reich, wurden nach den Analysen von Richard Evershed und seinen Kollegen von der Universität Bristol außer Harzen vor allem diverse Gummi verwendet, die wasserlöslichen Anteile von Gummiharzen. Das stellten auch andere Experten fest. So war der Grundbestandteil des Balsams für die Mumie von Ramses II. (Regentschaft 1290 – 1224 vor Christus) Tragant, ein gallertartig quellbarer und hornartig erhärtender Extrakt aus dem Saft von Sträuchern der Schmetterlingsblütler-Gattung *Astragalus*. Doch schon unter seinem Sohn und Nachfolger Merenptah (1224 – 1214 vor Christus) wurde der hohe Beamte Idu II. mit Koniferenharz einbalsamiert – ihm unterstand freilich das Büro für Tannenholzhandel.

Unsere chemischen Analysen verschafften uns schließlich auch gewisse Einblicke in die Zubereitung der Balsamierungssubstanzen. So fanden wir Ethylester, die durch Reaktion von Ethylalkohol mit Fettsäuren gebildet wurden; bei der Präparation muss demnach Wein verwendet worden sein. Außerdem wurden die Zutaten wahrscheinlich nicht über 200 Grad Celsius, das heißt nur eben bis zum Schmelzen erwärmt; denn starkes thermisches Cracken – also Spaltung von Molekülen durch Hitze – war nicht festzustellen. Nur bei einer Mumie gab es Anzeichen für die Spaltung von Kohlenwasserstoffen bei hohen Temperaturen; in diesem Falle hatten wohl Grabräuber in der Grabkammer einen Brand gelegt.

Wie es die Balsamierer der Pharaonenzeit schafften, die natürliche Verwesung zu verhindern und die Körper von Verstorbenen so zu präparieren, dass sie Jahrtausende erhalten blieben, war lange Zeit ein großes Rätsel. Die historischen Berichte konnten nur wenig zur Aufklärung beitragen. Erst mit den raffinierten Analysemethoden, die uns heute zur Verfügung stehen, ist es jetzt gelungen, das Geheimnis der altägyptischen Priester zu lüften, die vor mehr als 3000 Jahren schon fertig brachten, was ihnen erst im 20. Jahrhundert Chemiker an den Leichnamen berühmter Persönlichkeiten wie Lenin, Mao oder Papst Johannes XXIII. nachmachten. ■

Jacques Connan *ist stellvertretender Forschungsleiter am Labor für die Analyse natürlicher Substanzen in Straßburg und international tätiger Sachverständiger für organische Geochemie bei dem Unternehmen Totalfina Elf in Pau.* ***André Macke*** *ist Radiologe und Spezialist für Bildgebungsverfahren in der Medizin. Die inzwischen verstorbene* ***Christiane Macke-Ribet*** *war Medizinerin; sie und ihr Mann arbeiteten mit der Thebanischen Abteilung des Ägyptologischen Instituts im Louvre und dem Zentrum für Altägyptische Studien und ihre Dokumentation zusammen.*

Literaturhinweise

Mumien – Zeugen des Pharaonenreiches. Von R. Germer. Artemis & Winkler/CVK, Zürich/München 1991, Neuauflage: 2001.

„Dieser Körper von mir soll nicht vergehen ...“ Von B. Geßler-Löhr in: Praxis Geschichte, Heft 4, S. 52, 1995.

Ta Set Neferou. Une nécropole de Thèbes-Ouest: momification, chimie des baumes, anthropologie, paléopathologie. Von A. Macke, Ch. Macke-Ribet und J. Connan. Nubar Printing House, Kairo 2001.

Weblinks bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Mein Computer versteht mich

Was wäre, wenn der Computer den Inhalt einer Seite aus dem World Wide Web nicht nur anzeigen, sondern auch seine Bedeutung erfassen würde? Er könnte ungeahnte Dinge für seinen Benutzer tun – und das vielleicht schon bald, wenn das semantische Netz etabliert ist.

Von Tim Berners-Lee, James Hendler und Ora Lassila

Die Stereoanlange plärrt „We can work it out“ von den Beatles, als das Telefon klingelt. Sowie Peter den Hörer abnimmt, sendet das Telefon eine Nachricht an alle lokalen Geräte mit Lautstärkeregler, woraufhin die Beatles vorübergehend verstummen. Peters Schwester Lucy ist am Apparat, von der Arztpraxis aus: „Mama muss zu einem Spezialisten und dann alle zwei Wochen in die Physiotherapie. Ich lasse meinen Agenten die Termine organisieren.“ Peter erklärt sich bereit, einen Teil der Chauffeurdienste zu übernehmen.

Noch in der Praxis programmiert Lucy mit einem portablen Webbrowser ihren Webagenten. Dieser holt sich sogleich vom Agenten des Arztes die Daten des Rezepts, das der Arzt für Mama ausgestellt hat, und geht mehrere Listen mit Diensteanbietern (in diesem Falle Physiotherapeuten) durch. Daraus wählt er diejenigen aus, die für Mamas Krankenversicherung eine Zulassung haben, sich weniger als 30 Kilometer entfernt von ihrer Wohnung befinden und von vertrauenswürdigen Verbraucherorganisationen die Einstufung „ausgezeichnet“ oder „sehr gut“ erhalten haben. Schließlich gleicht er die freien Termine der ausgewählten Anbieter (die deren Agenten auf den entsprechenden Webseiten aufgelistet haben) mit Peters und Lucys dicht gedrängtem Terminplan ab. (Die rot gedruckten Wörter sind Begriffe, deren Bedeutung der Agent „kennt“.)

Ein paar Minuten später präsentiert der Agent einen Plan. Peter ist nicht begeistert; er müsste im dichtesten Berufsverkehr zur Universitätsklinik am anderen Ende der Stadt fahren. Er weist seinen eigenen Agenten an, die Suche zu wiederholen und dabei die Kriterien Standort und Zeit wichtiger zu nehmen. Lucys Agent, der für Aufgaben dieser Art volles Vertrauen in Peters Agenten hat, unterstützt diesen, indem er Zugangsausweise für gewisse Websites und halb aufbereitete Daten an ihn weiterreicht.

Kaum eine Sekunde später wird ein neuer Plan vorgeschlagen, mit einer näher gelegenen Praxis und günstigeren Terminen, allerdings mit zwei Warnhinweisen. Erstens müsste Peter ein paar weniger wichtige Verabredungen verlegen. Zweitens hat die Praxis zwar eine Zulassung von der Versicherung, aber nicht für Physiotherapie. Aber der Agent weiß Beruhigendes: „Behandlungstyp und Abdeckung durch Versicherung auf anderem Wege zuverlässig sichergestellt. (Einzelheiten?)“

Lucy stimmt dem Plan auf der Stelle zu; Peter knurrt nur: „Erspar mir die Einzelheiten“, und damit ist alles geregelt. (Natürlich kann Peter es nicht lassen, später am Abend seinen Agenten zu fragen, wie er diese Praxis gefunden hat, obwohl sie nicht in der richtigen Liste verzeichnet ist.)

Dies ist noch Zukunftsmusik. Heute könnten Peter und Lucy nicht einfach ein Stück Software (einen „Agenten“) beauftragen, im World Wide Web (WWW) die wesentlichen Informationen zusammenzusuchen, sondern müssten selber nachsehen. Die Dateien des WWW, die so genannten Websites, sind bislang darauf ausgelegt, von Menschen gelesen, nicht aber von Computerprogrammen



ALLE BILDER DES ARTIKELS: MIGUEL SALMERON

Eine Suche im World Wide Web bringt in aller Regel neben dem, was man sucht, eine große Anzahl irrelevanter „Treffer“, die man mühsam aussortieren muss. Wenn Sie etwa nach dem Wort „Cook“ suchen, hat der Computer keinen Anhaltspunkt, ob Sie sich für Meister der Kochkunst, Kochen oder eine Firma, Person, Insel, … dieses Namens interessieren. Das Wort „Cook“ hat nämlich für den Computer keinerlei Bedeutung.



ausgewertet und interpretiert zu werden. Computer können Websites zwar durchmustern und Überschriften oder Links (Verweise auf andere Web-Dateien) als solche erkennen; aber mit der Bedeutung einzelner Teile („Dies ist die Website der Gemeinschaftspraxis Dr. Hartman und Dr. Strauss“, „dieser Link führt zu Dr. Hartmans Lebenslauf“) können sie im Allgemeinen nichts anfangen.

Dem soll das Konzept abhelfen, das wir in diesem Artikel vorstellen. Wir nennen es „Semantic Web“, das „semantische“ oder auch „bedeutungstragende Netz“. Das semantische Netz wird den Inhalt von Websites mit einer Struktur versehen, sodass Softwareagenten von Datei zu Datei wandern und komplizierte Aufträge erfüllen können. Ein solcher Agent wird nicht nur wissen, dass die Website der Praxis Schlüsselwörter wie „Behandlung“, „Medizin“ und „Physiotherapie“ enthält (das schaffen Suchmaschinen schon heute), sondern auch, dass Dr. Hartman montags, mittwochs und freitags in der Praxis arbeitet, und außerdem, dass die Website Terminanfragen im Format jjjj-mm-tt entgegennimmt und daraufhin Termine anbietet. Dabei verfügt der Agent über nicht entfernt so viel künstliche Intelligenz wie HAL aus dem Film „2001“ oder C-3PO aus „Krieg der Sterne“. Auch die Bereitstellung der bedeutungsträchtigen Website erfordert keine besondere Genialität: Die Arzthelferin (die nie eine Anfängervorlesung Informatik besucht hat) nimmt ein Standard-Semantik-Softwarepaket, reichert es mit Daten an, die auf der Website der Physiotherapeuten-Berufsvereinigung bereitstehen, und trägt die Daten der individuellen Praxis in vorbereitete Felder ein; das ist alles.

Bedeutung ausdrücken

Das semantische Netz ist kein neues Netz, sondern eine Erweiterung des bestehenden, in der Informationen mit maschinenlesbarem Bedeutungsinhalt versehen sind. Die ersten Schritte zum Aufbau des semantischen Netzes wurden bereits getan. In naher Zukunft wird es Maschinen befähigen, Daten zu verarbeiten und zu „verstehen“, die sie heute lediglich anzeigen.

Die wesentliche Eigenschaft des gegenwärtigen Webs ist seine Universalität. Ein Link kann alles mit allem verbinden. Die Technologie des Netzes muss daher alle gleich bedienen: professionell gemachte Websites und Anfängerarbeiten, kommerzielle und akademische Informationen, verschiedene Kulturen, Sprachen und so weiter. Informationen unterscheiden sich in mehreren Aspekten, zum Beispiel darin, ob der Empfänger in erster Linie ein Mensch oder ein Computer sein soll. Am einen Ende der Skala haben wir alles Mögliche vom Werbespot bis zum Liebesgedicht; am anderen Ende stehen Datenbanken, Programme und automatisch übermittelte Messdaten. Bislang transportiert das Web vor allem menschenlesbare Informationen, und automatisch verarbeitbare Daten wurden vernachlässigt. Das semantische Netz verspricht hier Abhilfe.

Wie das Internet selbst wird es so dezentralisiert wie möglich sein – und damit ebenso erregend und unvorhersagbar. Vorzüge, die heute noch niemand erahnen kann, werden sich herausstellen; aber die Dezentralisierung hat einen Preis. Im heutigen Web ist es die berüchtigte Fehlermeldung „Error 404: Not Found“. Wenn jeder das Seinige zum großen Netz beitragen darf, ohne kontrolliert zu werden, muss man Defekte in Kauf nehmen.

Damit das semantische Netz funktioniert, müssen Computer Zugriff auf strukturierte Informationen haben und über Schlussregeln verfügen, mit denen sie diese Informationen automatisch verknüpfen können. Forscher auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz befassen sich seit langem mit diesem Problemkreis – weit länger, als es das Web gibt. Das Forschungsfeld der „Wissensrepräsentation“ (*knowledge representation*) ist gegenwärtig in einem ähnlichen Stadium wie vor den Zeiten des Webs das Prinzip Hypertext (eine Datei enthält Verweise auf andere Stellen innerhalb derselben Datei): offenbar eine gute Idee, die auch schon an ein paar eindrucksvollen Beispielen demonstriert worden ist, aber die Welt noch nicht verändert hat. Das Potenzial ist gewaltig; aber zu seiner Entfaltung muss die Idee in ein globales System eingebunden werden.

Heutige Systeme zur Wissensdarstellung („Expertensysteme“) sind zentralisiert und zwingen jeden Benutzer zur Verwendung ihrer Definitionen für Aller- ▶

weltsbegriffe wie „Eltern“ oder „Fahrzeug“. Zentrale Kontrolle behindert jedoch Innovation, und je mehr ein solches System an Größe und Anwendungsbereich wächst, desto aufwändiger wird seine Verwaltung.

Darüber hinaus lassen solche Systeme nur Fragen aus einem sorgfältig und eng umgrenzten Bereich zu, damit die Antworten des Computers hinreichend zuverlässig ausfallen – wenn er überhaupt antwortet. Das Problem erinnert an den berüchtigten Satz von Gödel: Jedes System, das komplex genug ist, um von Nutzen zu sein, lässt auch Fragen zu, die es nicht beantworten kann – komplizierte Versionen des allgemein bekannten Paradoxes „Dieser Satz ist falsch“. Zur Vermeidung solcher Probleme pflegen herkömmliche Expertensysteme ihre eigenen, höchst spezialisierten Regelwerke auf ihre Daten anzuwenden. Ein Genealogiesystem, das mit einer Datenbank von Stammbäumen arbeitet, wird etwa die Regel „Die Gattin eines Onkels ist eine Tante“ enthalten. Aber die Formate, in denen diese Regeln niedergelegt werden, sind so uneinheitlich, dass sie im Allgemeinen nicht auf ein anderes System übertragbar sind – selbst wenn die Übertragung der Daten gelingt.

Universalität muss erhalten bleiben

Dagegen nehmen die Verfechter des semantischen Netzes Paradoxa und unbeantwortbare Fragen als Preis der Universalität in Kauf. Für unsere Schlussregeln stellen wir eine Fülle an Ausdrucksmöglichkeiten bereit, damit ein Web-Agent entsprechend vielfältige und weitgehende Schlüsse ziehen kann.

Diese Philosophie ist an die des gewöhnlichen Webs angelehnt. In seinem Frühstadium wiesen Skeptiker darauf hin, dass es unter keinen Umständen eine wohlgeordnete Bibliothek sein würde, da man ohne Zentralkatalog und Suchbaum niemals mit Sicherheit alles würde finden können. Sie hatten Recht. Die Ausdrucksmöglichkeiten des Webs machten jedoch ungeheure Mengen von Informationen verfügbar, und Suchmaschinen (vor zehn Jahren noch so gut wie undenkbar) kommen in ihrer Leistung dem erträumten Zentralkatalog bemerkenswert nahe.

Die Kunst besteht also darin, eine Sprache bereitzustellen, die sowohl Daten als auch Schlussregeln ausdrückt und in die man Daten und Schlussregeln jedes Expertensystems übersetzen und damit ins Netz transportieren kann.

Der erste Schritt zu diesem Ziel besteht darin, das Web mit Logik auszustatten – einem Werkzeug zur Anwendung von Regeln, das Schlüsse ziehen, Entscheidungen treffen und Fragen beantworten kann. Hinzu kommen etliche mathematische und technische Probleme. Die Logik muss hinreichend reichhaltig sein, um komplizierte Sachverhalte auszudrücken, aber nicht so reichhaltig, dass ein Agent sich – möglicherweise durch eine böswillig formulierte Frage – in einem Paradox verfängt. Glücklicherweise ist die große Mehrzahl der auszudrückenden Informationen von der Machart „Ein Käfer ist ein Insekt“, was in existierenden Programmiersprachen – mit geringen Erweiterungen – leicht formulierbar ist.

Zwei wichtige Rahmenwerke für die Entwicklung des semantischen Netzes gibt es bereits: die erweiterbare Markup-Sprache XML und das Ressourcenbeschreibungssystem RDF (siehe Glossar). Mit XML kann jeder seine Website mit selbst definierten, unsichtbaren, aber maschinenlesbaren Etiketten (*tags*) anreichern. Programme können dadurch anspruchsvolle Aufgaben lösen: Wenn ein Tag namens <PLZ> die Postleitzahl innerhalb einer Adresse kennzeichnet, kann ein Programm auf wenige Kilometer genau ansagen, wie weit es bis zum Inhaber der Adresse ist. Das hilft allerdings nur dann, wenn der Programmierer weiß, wofür <PLZ> steht. XML strukturiert Websites, sagt aber nichts darüber aus, was die Struktur bedeutet (Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 74).

Diese Bedeutung wird durch RDF ausgedrückt. Ein typischer RDF-Aus-

Glossar

Agent: ein Programm, welches ohne ständige Überwachung und Kontrolle durch den Menschen arbeitet, um spezifische Aufgaben zu erledigen. Gewöhnlich sammeln, filtern und verarbeiten Agenten Informationen, die sie im Web finden, häufig mit Hilfe anderer Agenten.

HTML (*HyperText Markup Language*): In dieser Sprache werden Format, Links und andere Merkmale einer Website codiert. Dies geschieht mit einer Reihe von Kennwörtern (*tags*) wie etwa <H1> und <BODY>, deren Bedeutung vom WWW-Konsortium weltweit verbindlich festgelegt wurde.

XML (*eXtensible Markup Language*): eine Sprache mit der gleichen Grundstruktur wie HTML, in der jedoch der Nutzer seine eigenen Tags definieren darf. XML enthält keine Automatik, mit der die Bedeutung der neuen Tags von Nutzer zu Nutzer vermittelt werden könnte.

URL (*uniform resource locator*): der Code, in dem die Internet-Adresse einer Website ausgedrückt wird. Beispiel: http://www.wissenschaft-online.de/spektrum

URI (*uniform resource identifier*): Oberbegriff zu URL. Ein URI definiert oder beschreibt eine „Quelle“ (*resource*) von Informationen (in der Regel eine Website), nicht notwendig (aber meistens) über ihre Adresse. Für Zwecke des semantischen Netzes wird der Begriff „resource“ bis zur Unkenntlichkeit erweitert auf alle Gegenstände (Dinge, Personen, Orte, …), von denen im Rahmen von RDF (siehe unten) die Rede sein kann.

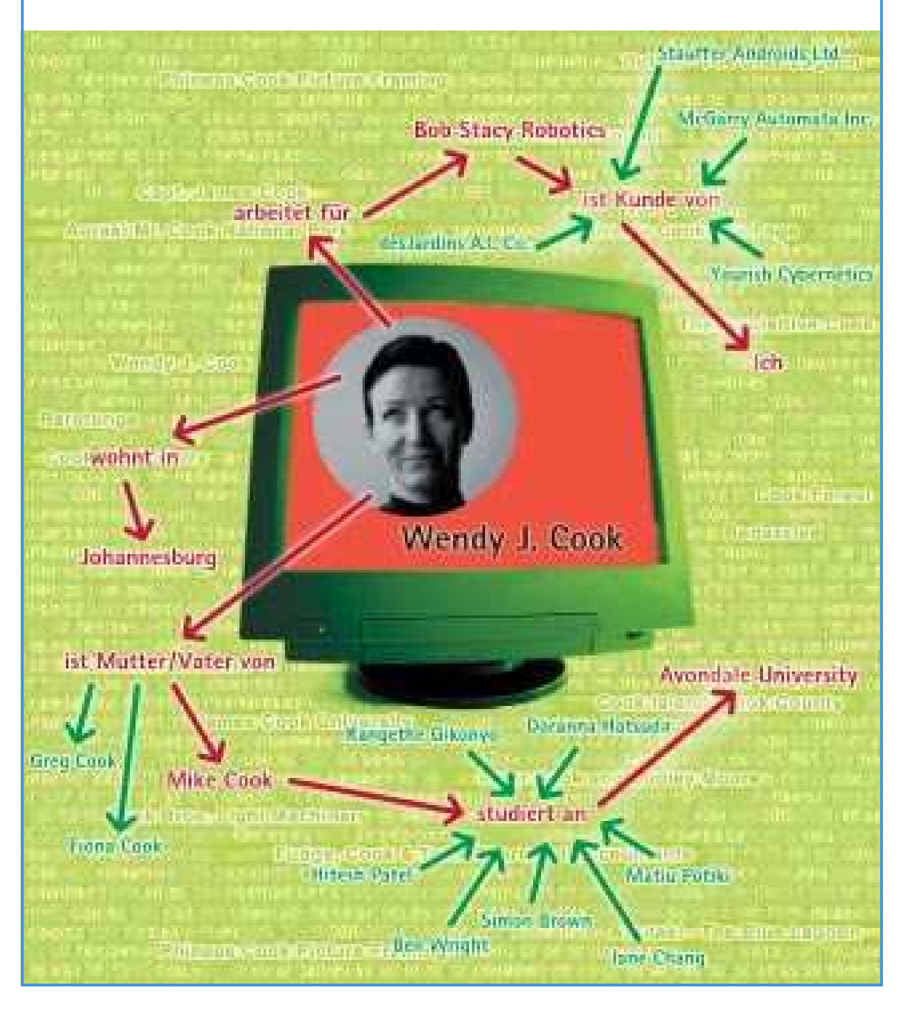
RDF (*resource description framework*): ein Code zur Definition von Informationen im Web, der die Bedeutung von Begriffen so darstellt, dass ein Computer sie unmittelbar verarbeiten kann. RDF verwendet (zum Beispiel) die Syntax von XML und drückt Dinge, Konzepte, Eigenschaften und Relationen mit Hilfe ihrer URIs aus.

Ontologien: In einer Sprache (wie RDF) verfasste Aussagen, die Beziehungen zwischen Konzepten und logische Schlussregeln für sie festlegen. Computer werden die Bedeutung semantischer Daten im Web „verstehen“, indem sie Links zu speziellen Ontologien folgen.

Servicesuche (*service discovery*): das Finden eines Agenten oder automatischen Webdienstes, welcher dem anstehenden Problem entspricht. Mit Semantik werden Agenten einander sagen können, welche Funktion sie gerade ausführen und welche Daten sie dazu benötigen.

Wie hieß die Frau bloß mit Vornamen?

Wenn die semantische Ausstattung von Websites erst allgemein üblich ist, werden komplizierte, automatisierte Suchakte möglich. Nehmen wir an, Sie haben nur bruchstückhafte Erinnerungen an eine Person: Ihr Nachname ist „Cook“, sie arbeitet für eine Firma auf Ihrer Kundenliste, und sie hat einen Sohn, der an der Avondale University studiert. Keine Website für sich enthält die richtige Kombination dieser Informationen; dank der Semantik kann das Suchprogramm jedoch die Inhalte verschiedener Websites in Beziehung zueinander setzen, Relationen wie „Mike Cook ist Kind von Wendy Cook“ verstehen und aus alldem die richtigen Schlüsse ziehen.



druck besteht aus drei Gliedern, ähnlich wie Subjekt, Prädikat und Objekt eines einfachen Satzes. Jedes Glied kann seinerseits unter Verwendung von XML-Tags geschrieben werden. Ein solcher Satz drückt aus, dass ein Subjekt (eine Person, eine Website und so weiter) in einer bestimmten Relation („ist Schwester von“, „ist Autor von“) zu einem Objekt steht (einer anderen Person, Website und so weiter). Es stellt sich heraus, dass mit dieser Struktur der größte Teil der vom Computer zu verarbeitenden Informationen zwanglos zu beschreiben ist. Subjekt und Objekt sind im einfachsten Falle Web-Adressen (*uniform resource locators*, URLs), das heißt, der Gegenstand einer Aussage wird durch die Stelle gekennzeichnet, wo er zu finden ist, und im allgemeinen Falle formalisierte Beschreibungen (*uniform resource identifiers*, URIs). Der häufigste Spezialfall eines URI ist ein URL.

Die Prädikate (Relationen) sind ebenfalls durch URIs gekennzeichnet, sodass jeder durch die Definition eines neuen URI irgendwo im Web ein neues Verb, das heißt eine neue Relation, definieren kann.

In der menschlichen Sprache sind, im Gegensatz zu Computersprachen, leichte Bedeutungsverschiebungen möglich und kommen ständig vor. Stellen Sie sich vor, ich beauftrage einen Spaßmacherservice, meinen Kunden zu ihrem Geburtstag durch einen Clown Luftballons zu überbringen. Der Service übernimmt die Adressen meiner Kunden von meiner Datei in seine, ohne sich bewusst zu machen, dass darunter zahlreiche Postfächer sind – da, wo man halt die Rechnung hinschickt. Die Clowns werden also statt meiner Kunden Postbeamte belustigen – auch nicht schlecht, aber nicht ganz im Sinne des Auftraggebers.

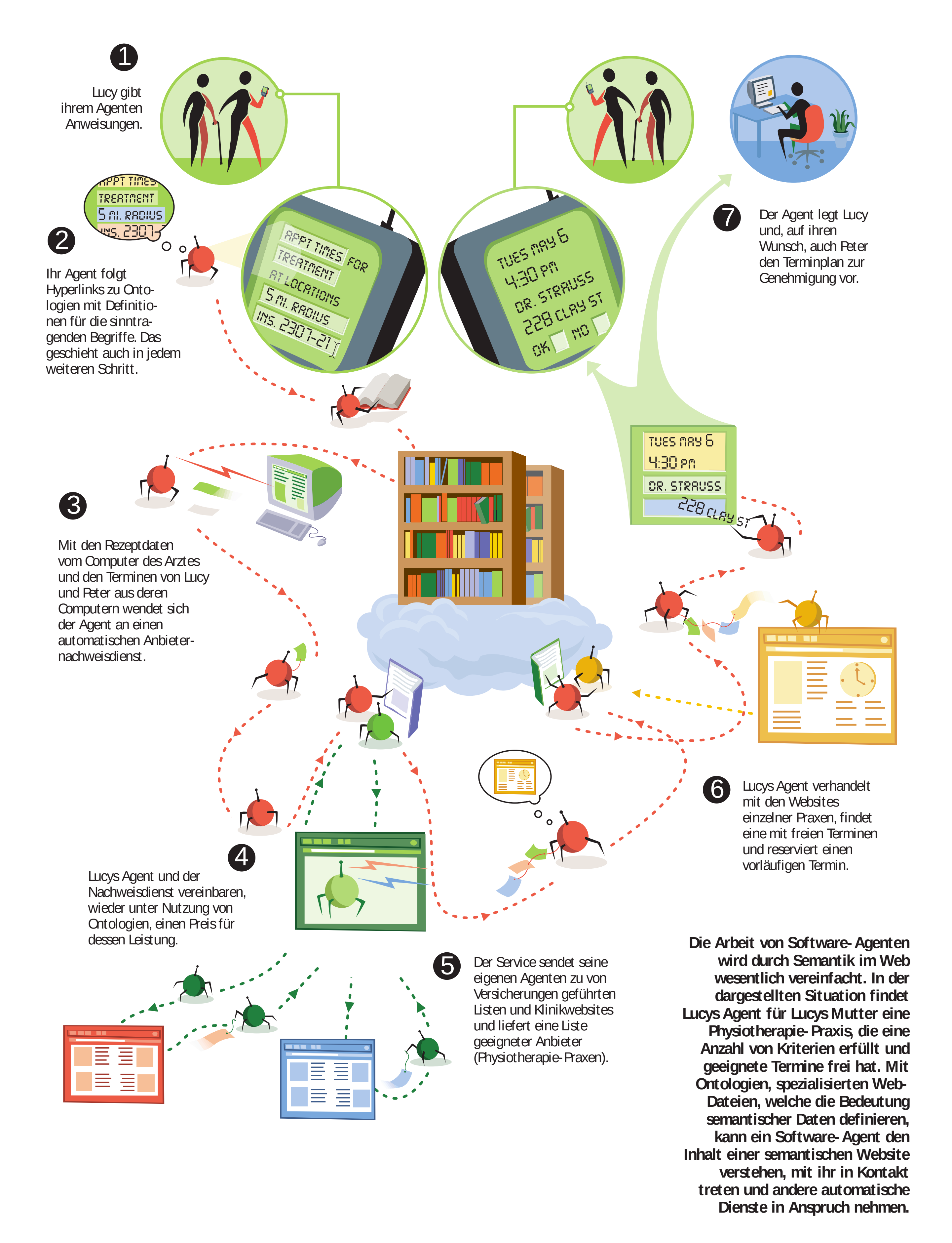
Die Lösung des Problems besteht darin, für verschiedene Bedeutungen desselben Wortes verschiedene URIs zu verwenden. So können Postanschriften von Wohnadressen unterschieden werden und beide wiederum von einer Speicheradresse.

Die RDF-Tripel (die dreigliedrigen Ausdrücke aus Subjekt, Prädikat und Objekt) knüpfen ein Netz von Informtionen über miteinander verwandte Begriffe. Da RDF diese Informationen mit URIs codiert, bleiben sie nicht bloße Wörter, sondern sind Begriffe mit konkreten, leicht zu findenden Definitionen. Stellen Sie sich etwa vor, wir hätten Zugriff auf eine Datei mit Informationen über Personen, darunter deren Adressen. Suchen wir nach Leuten, die in einem bestimmten Postleitzahlenbereich wohnen, müssen wir wissen, welches Feld der Datenbank den Namen und welches die Postleitzahl enthält. Diese Information liefert ein RDF-Tripel der Form „(das 5. Feld der Datenbank A) (ist ein Feld des Typs) (Postleitzahl)“, wobei an Stelle jedes Klammerausdrucks ein URI steht.

Ontologien

Das allerdings reicht noch nicht aus. Wenn jeder Autor einer Datenbank seine Felder frei definieren darf – auch wenn er die Definitionen im Web veröffentlicht –, dann werden unweigerlich verschiedene Namen für denselben Begriff, etwa Postleitzahl, verwendet werden. Ein Programm, das Informationen aus beiden Datenbanken verknüpfen soll, muss wissen, dass beide Namen die gleiche Bedeutung haben. Idealerweise würde es solche identischen Bedeutungen in allen Datenbanken, mit denen es arbeitet, auf irgendeine Weise erkennen.

Die Lösung dieses Problems besteht in der dritten Komponente des semantischen Netzes: einer Bibliothek von speziellen Informationen namens Ontologien. In der Philosophie ist eine Ontologie eine Theorie vom Wesen der Existenz; die Ontologie als akademische Disziplin studiert Fragen der Art, welche Typen von Dingen überhaupt existieren. ▶



Die Arbeit von Software-Agenten wird durch Semantik im Web wesentlich vereinfacht. In der dargestellten Situation findet Lucys Agent für Lucys Mutter eine Physiotherapie-Praxis, die eine Anzahl von Kriterien erfüllt und geeignete Termine frei hat. Mit Ontologien, spezialisierten Web-Dateien, welche die Bedeutung semantischer Daten definieren, kann ein Software-Agent den Inhalt einer semantischen Website verstehen, mit ihr in Kontakt treten und andere automatische Dienste in Anspruch nehmen.

Die Vertreter der Forschungsrichtung Künstliche Intelligenz haben den Terminus für sich vereinnahmt und verwenden ihn für Dokumente oder Dateien, die Relationen zwischen Dingen formal definieren. Eine typische Web-Ontologie besteht aus einer Taxonomie (Klassifizierung) und einer Liste von Schlussregeln.

Die Taxonomie definiert Objektklassen und zwischen ihnen bestehende Relationen. So würde eine Taxonomie eine Adresse als eine spezielle Art von Ortsangabe definieren, dabei festlegen, dass eine Postleitzahl sich nur auf eine Ortsangabe beziehen kann, und so weiter. Formal gesprochen: Die Klasse der Adressen ist eine Teilklasse der Klasse der Ortsangaben und „erbt" damit alle Eigenschaften der übergeordneten Klasse: Eine Eigenschaft, die für Ortsangaben im Allgemeinen gilt, trifft auch auf Adressen im Besonderen zu, und ein Programm kann das mit Hilfe der Taxonomie erschließen.

Allgemein sind Klassen, Unterklassen und Relationen zwischen ihnen mächtige Mittel für das automatisierte logische Schließen. Wenn etwa Postleitzahlen vom Typ Stadt sind und Städte generell Websites besitzen, so kann man von der Website einer Postleitzahl sprechen und unsere Agentensoftware danach suchen lassen, obgleich es keine Datenbank gibt, die Postleitzahlen und die Websites der zugehörigen Städte miteinander verknüpft.

Schlussregeln verleihen Ontologien noch mehr Wirkung. Eine Ontologie kann etwa die Regel ausdrücken „Wenn eine Postleitzahl einen Ländercode enthält, und eine Adresse enthält diese Postleitzahl, dann ist diese Adresse im entsprechenden Land." Ein Programm könnte dann aus der Postleitzahl D-66123 ohne weitere Informationen deduzieren, dass sich das Max-Planck-Institut für Informatik in Deutschland befindet, und so das richtige Anschriftenformat auswählen. Der Computer „versteht" natürlich nichts von alldem im wörtlichen Sinne, kann aber mit den Begriffen auf eine für den Nutzer hilfreiche und einleuchtende Weise umgehen.

Ontologische Websites versprechen unter anderem, Lösungen für Terminologieprobleme bereitzustellen. Wenn die Bedeutung eines Kennworts oder XML-Codes in einer Website durch Verweis auf eine Ontologie definiert wird, kann (und wird) es vorkommen, dass ich auf eine Ontologie verweise, die „zip code" als Adressbestandteil erklärt, während Ihre Lieblings-Ontologie an dieser Stelle „Postleitzahl" aufführt. Aber es kann (und wird) dann irgendwo im Web wenigstens eine Ontologie geben, die erklärt, dass beides dasselbe ist.

Mein Problem, den Kunden die Luftballons nach Hause statt ins Postfach zu bringen, ist zumindest zur Hälfte gelöst, wenn beide Datenbanken mit präzisen Definitionen von Adresse arbeiten. Wenn ein Programm verschiedene URIs für Adressen verschiedener Art vorfindet, wird es beide jedenfalls nicht miteinander verwechseln. Stattdessen muss es jetzt erst herausfinden, dass sie etwas miteinander zu tun haben! Dafür gäbe es dann einen Service, der Postanschriften (Adressen der ersten Art) in Wohnanschriften (Adressen der zweiten Art) umsetzt, indem es Postfächer und andere unzulässige Bestandteile erkennt und durch brauchbare ersetzt. Die von Ontologien bereitgestellte Struktur und Semantik macht das Anbieten eines solchen Services einfach und seinen Gebrauch vollkommen durchschaubar.

Das semantische Netz findet alte Bekannte wieder

Ontologien können das Web in vielerlei Hinsicht nützlicher machen. Bereits in ihrer einfachsten Form erhöhen sie die Trefferrate von Recherchen, indem das Suchprogramm einen genau definierten Begriff statt möglicherweise zweideutiger Suchwörter verwendet. Verbesserte Programme werden mit Hilfe von Ontologien noch gezielter Informationen aus einer Website ziehen, indem sie Schlussregeln und Informationen aus externen Wissensspeichern einsetzen. Ein Beispiel einer solchen Webseite ist http://www.cs.umd.edu/~hendler. Mit einem der heute üblichen Webbrowser werden Sie eine normale Website mit dem Titel „Dr. James A. Hendler" vorfinden. Sie selbst werden leicht den Link zu einem kurzen Lebenslauf finden, der angibt, dass Hendler an der Brown-Universität promoviert hat. Ein Computerprogramm müsste dagegen ziemlich komplex sein, um aus dem englischen Wortlaut zu erschließen, dass diese Seite einen Lebenslauf enthält.

Diese Website verweist jedoch auf eine Ontologie, die Informationen über Informatik-Fakultäten enthält, zum Beispiel allgemeine Weisheiten wie, dass Professoren an Universitäten arbeiten und in der Regel promoviert haben. Weitere Kennzeichen (*markups*) in der Website (die von typischen Webbrowsern nicht angezeigt werden) zeigen mit durch die Ontologie definierten Kennwörtern an, dass Hendler an einer Institution promovierte, die durch den URI http://www.brown.edu – die Webadresse der Brown-Universität – gekennzeichnet ist. Ebenso ist für Computer auffindbar verzeichnet, an welchen Forschungsprojekten Hendler arbeitet, welches seine E-mail-Adresse ist und so weiter. Anfragen wie etwa „Wo hat Hendler promoviert?", für die gegenwärtig noch ein Mensch alle von der Suchmaschine aufgeführten Websites durchsehen muss, würden dann automatisch beantwortet werden.

Die Markups erleichtern darüber hinaus die Bewältigung schwierigerer Aufgaben, etwa Daten aus vielen verschiedenen Websites zu einem konkreten Zweck zusammenzuführen. Nehmen Sie einmal an, Sie wollten eine gewisse Frau Cook finden, die Sie letztes Jahr auf der Industriemesse getroffen haben. Den Vornamen wissen Sie nicht mehr, wohl aber, dass sie für einen Ihrer Kunden arbeitet und dass ihr Sohn an der Avondale University studiert. Ein intelligentes Suchprogramm kann die Websites aller Perso-



Was wird die *killer application*?

Der Durchbruch

Wenn wir Vorträge über das semantische Netz halten, werden wir oft nach der „killer application“ gefragt: Welche Anwendung wird eine so große Anzahl von Nutzern neugierig machen, dass sie den Durchbruch bringen wird? So wie das Transistorradio für den Transistor oder das Handy für den Mobilfunk?

Was also wird den Durchbruch für das semantische Netz bringen? „Das semantische Netz.“

Nach dieser Antwort pflegt man uns für leicht verrückt zu halten, also antworten wir mit einer Gegenfrage: „Was verhalf dem World Wide Web zum Durchbruch?“ Sprachlosigkeit; also antworten wir selbst: „Das Web verhalf dem Internet zum Durchbruch, und das semantische Netz wird von der gleichen Größenordnung sein.“

Die Natur des semantischen Netzes ist so vielgestaltig, dass es die eine *killer application* nicht geben wird. Vielmehr wird das semantische Netz einmal Aufgaben lösen, von denen wir heute noch nicht einmal träumen.

Immerhin können wir uns ein paar – nicht gerade revolutionäre, aber hilfreiche – Anwendungen vorstellen. Online-Kataloge mit Semantik werden sowohl Käufern als auch Händlern Vorteile bieten. Elektronische Geschäfte werden von kleineren Unternehmen leichter, sicherer, und unabhängiger abgewickelt werden können.

Nehmen wir an, Sie buchen eine längere Reise. Fluglinien, Hotels, Fußballstadien und so weiter bestätigen Ihre Reservierungen. Ihre semantische Software lädt die Zeiten in Ihren Terminplaner und alle Rechnungen in Ihr Kontoprogramm, und zwar ohne großen Austausch von E-Mails und ohne dass Sie und die zahlreichen Unternehmen, deren Dienste Sie in Anspruch nehmen, ihre Software-Standards aneinander hätten anpassen müssen.

nen namens „Cook“ durchgehen (ohne sich von englischsprachigen Websites über Köche, Kochen, die Cook-Inseln und so weiter ablenken zu lassen), diejenigen finden, die für ein Unternehmen in Ihrer Kundenliste arbeiten, und dann Links zu deren Kindern folgen, um herauszufinden, welche an der richtigen Universität studieren. Die vielen Meldungen über den ehemaligen britischen Außenminister muss kein Mensch mehr durchgehen.

Das semantische Netz wird seine Möglichkeiten erst richtig entfalten, wenn viele Programme geschrieben werden, die Informationen aus dem gesamten Web sammeln, verarbeiten und mit anderen Programmen austauschen. Die Effektivität solcher Software-Agenten wird exponentiell mit der Zahl maschinenlesbarer Websites und automatischer Informationsdienste (einschließlich anderer Agenten) anwachsen. Das semantische Netz unterstützt diese Synergieeffekte, da in ihm ein Agent mit einem beliebigen anderen schon dann Daten austauschen kann, wenn er deren Bedeutung erfasst. Es ist nicht erforderlich, dass einer der Agenten explizit auf Zusammenarbeit mit dem anderen programmiert ist.

Literaturhinweis

Weaving the Web: The Original Design and Ultimate destiny of the World Wide Web by Its Inventor. Von Tim Berners-Lee. Harper, San Francisco 1999.

Weblinks zum Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Beweisfähige Agenten

Ein wichtiger Teil der Agententätigkeit wird die Kommunikation von „Beweisen“ sein, die in der Standardsprache des semantischen Netzes formuliert sind. Nehmen wir an, ein Online-Service findet Frau Cooks Adresse, und zu Ihrer großen Überraschung ist sie in Johannesburg (Südafrika). Das kommt Ihnen merkwürdig vor; also verlangt Ihr Computer vom Service einen Beweis für diese Behauptung, woraufhin dieser prompt in der Universalsprache des semantischen Netzes die Schlussfolgerungen aufführt, die ihn zu seiner Antwort veranlasst haben. Ein Logikprogramm auf Ihrem Computer bestätigt, dass diese Frau Cook tatsächlich diejenige ist, nach der Sie suchen, und es kann Ihnen die relevanten Websites zeigen, falls Sie noch immer Zweifel haben. Noch sind wir weit davon entfernt, dieses Potenzial auszuschöpfen; aber es gibt bereits Programme, die Beweise auf diese Art austauschen können, in der gegenwärtigen, vorläufigen Version der Universalsprache.

Ein besonders wichtiger „Beweis“ ist die digitale Unterschrift, ein verschlüsselter Datenblock, der Computern und Agenten die Gewissheit verschafft, dass eine bestimmte Information aus einer zuverlässigen Quelle stammt. Schließlich möchten Sie sicher sein, dass eine Rechnung, die zu Ihrem Kontoführungsprogramm gesendet wurde, wirklich von dem Onlinehändler stammt, dem Sie etwas schuldig sind, und nicht vom technisch begabten Sohn Ihres Nachbarn. Agenten sollten nichts, was sie im Web hören, für bare Münze nehmen, bis sie sich von der Echtheit der Quellen überzeugt haben. (Wie schön wäre es, wenn bereits heute mehr Menschen diesem Rat folgten!)

Es gibt bereits Websites, die ohne irgendwelche Semantik auf Anforderung automatisch bestimmte Funktionen ausführen, wie Auskunfterteilung, Ticketbestellung und Ähnliches. Agenten und andere Programme haben aber keinerlei Anhaltspunkte, welcher Service welche Funktionen ausführt. Dienste und Agenten müssten ihre Angebote in einer Art Web-Branchentelefonbuch veröffentlichen. Dazu muss es eine gemeinsame Sprache geben, die Agenten den Zweck und die Funktionsweise eines Webdienstes erkennen lässt.

Einige primitive Service-Such-Programme sind heute schon verfügbar, wie etwa „Universal Plug and Play“ von Microsoft, das verschiedene Gerätetypen kompatibel macht, und „Jini“ von Sun Microsystems, das Dienste zusammenschalten soll. Diese Ansätze greifen jedoch das Problem auf formale – nichtsemantische – Weise an und hängen davon ab, dass für das, was da zusammengebracht werden soll, einheitliche, standardisierte Funktionsbeschreibungen vorliegen. Standardisierung jedoch funktioniert nur bis zu einem bestimmten Punkt, da wir unmöglich alle zukünftigen Bedürfnisse vorhersehen können.

Das semantische Netz ist hier flexibler. Konsumenten- und Anbieteragenten können sich durch Rückgriff auf Ontologien verständigen, da diese das Vokabular für den Informationsaustausch zur

Verfügung stellen. Agenten können sich sogar neue Denkweisen zulegen, wenn sie auf neue Ontologien stoßen. Semantik macht auch die Inanspruchnahme von Diensten leichter, die für eine Anfrage nicht genau maßgeschneidert sind.

Ein typischer Suchprozess wird aus einer „Wertschöpfungskette“ bestehen, in welcher ein Agent Rohinformationen an den nächsten weiterreicht; der schafft dann durch deren Verarbeitung einen Mehrwert, und so weiter, bis die Kette den Endnutzer erreicht. Wohlgemerkt: Das semantische Netz allein wird komplizierte Wertschöpfungsketten nicht automatisch auf Anforderung knüpfen können. Manche Agenten werden darüber hinaus Techniken der Künstlichen Intelligenz einsetzen. Immerhin wird das semantische Netz bessere Grundlagen und Rahmenbedingungen für diese Techniken bereitstellen.

Die Kombination all dieser Funktionen ermöglicht Leistungen von der Art, wie sie im einführenden Beispiel illustriert wurden. Peters und Lucys Agenten würden Aufgaben an andere Dienste, die sie in einem Anbieterverzeichnis finden, delegieren. Zum Beispiel würden sie einen vertrauenswürdigen Service damit beauftragen, aus einer Liste von Kliniken diejenigen herauszusuchen, die von der Versicherung für die geforderte Behandlung zugelassen sind. Die Klinikliste käme von einer anderen Suchmaschine und so weiter. Im Endeffekt wird eine riesige Menge von (in dieser Form nutzlosen) Daten aus dem gesamten Web so lange gefiltert, bis schließlich nur die wenigen Fakten übrig bleiben, auf die es für Peter und Lucy ankommt: eine Liste von Terminen, die mit ihrem Kalender vereinbar sind.

Im nächsten Schritt wird das semantische Netz die Schranken der virtuellen Welt durchbrechen und in die Realität eintreten. URIs können auf alles Mögliche verweisen, darunter auch physikalische Geräte. Daher kann die RDF-Sprache auch ein Handy oder ein Fernsehgerät beschreiben. Solche Geräte können dann wie Software-Agenten ihre Funktionalität – was sie tun und wie sie zu bedienen sind – anpreisen. Ein derartiges semantisches Konzept ist weit vielseitiger als hardwarenahe Konzepte wie „Universal Plug and Play“ und eröffnet eine ganz neue Welt von Möglichkeiten.

So erfordert das, was man heute Heimautomatisierung nennt, eine sehr mühsame Konfiguration zur Abstimmung der einzelnen Geräte. Semantische Beschreibungen ihrer Funktion und ihres Zweckes werden eine solche Automatisierung weitaus einfacher machen. Ein einfaches Beispiel ist die Lautstärkeregelung beim Abnehmen des Telefons. Statt jedes Gerät einzeln zu programmieren, könnte man es so einrichten, dass jedes lokale Gerät mit Lautstärkeregler – Fernsehen, Radio, ja selbst der Walkman, den der Sohn gerade heute zufällig eingeschleppt und liegen gelassen hat – sich automatisch angesprochen fühlt.

Wissensevolution

Die ersten konkreten Schritte in diese Richtung sind bereits getan. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung eines Standards für die Beschreibung von Geräteeigenschaften (wie etwa Bildschirmgrößen) und Nutzervorlieben. Er beruht auf RDF und heißt Composite Capability/Preference Profile (CC/PP). In der Sprache dieses Standards können Handys und andere Geräte, die eigentlich nicht an das Web angeschlossen sind, ihre Eigenschaften ausdrücken, sodass sie unmittelbar aus dem Web heraus ansprechbar sind – und sei es mit der Anweisung „Stell dich leise“. Später, wenn wir die Sprache auf logisches Schließen und den Umgang mit Ontologien erweitert haben, können Geräte automatisch nach anderen Diensten suchen und diese in Anspruch nehmen, um ihre eigenen Fähigkeiten zu erweitern. Dann fragt Ihr Mikrowellenherd beim Hersteller eines Gefriergerichtes die optimale Zubereitungsweise ab!

Das semantische Netz ist jedoch mehr als nur ein Werkzeug zur Lösung all dieser Aufgaben. Richtig konstruiert, kann es die Evolution menschlichen Wissens insgesamt beschleunigen.

Alle menschlichen Projekte stehen in einem Spannungsfeld zwischen der Effektivität kleiner Gruppen und der vielen Information draußen in der großen Welt. Eine kleine Gruppe kann schnell und effektiv neue Ideen entwickeln, droht aber bei mangelhaftem Austausch den Kontakt zur Außenwelt zu verlieren. Der Austausch innerhalb großer Gruppen hingegen geht quälend langsam vonstatten und erfordert hohen Kommunikationsaufwand. Die Welt arbeitet auf einer Skala zwischen diesen Extremen, wobei man gewöhnlich klein anfängt – mit der Idee eines Einzelnen – und sich zu einem größeren Publikum hocharbeitet.

Dabei kommt es entscheidend darauf an, dass zwei Gruppen, die vielleicht ähnliche Konzepte entwickelt haben, zu einer gemeinsamen Sprache oder zumindest zu einer Umsetzung zwischen ihren Begriffen finden. Wie ein finnisch-englisches Wörterbuch oder eine Umrechnungstabelle für Maße und Gewichte gestatten solche Relationen Kommunikation und Zusammenarbeit, selbst wenn die beiden Gruppen eine gemeinsame sprachliche Basis (noch) nicht gefunden haben.

Das semantische Netz gestattet die Definition neuer Begriffe mit minimalem Aufwand: Man schreibe einen URI. Seine einheitliche logische Sprache wird die Einbeziehung dieser Begriffe ins weitere Web gestatten. Die semantische Struktur eröffnet menschliches Wissen und menschliche Arbeitsweisen der Analyse durch Software-Agenten, sodass eine neue Klasse von Werkzeugen entsteht, mit denen wir miteinander leben, arbeiten und lernen können. ■



Tim Berners-Lee *ist Direktor des World-Wide-Web-Konsortiums (W3C) und Forscher am Informatiklaboratorium des Massachusetts Institute of Technology. Als er 1989 das Web erfand, hatte er dafür mehr semantischen Inhalt im Sinn, als später allgemein gebräuchlich wurde.*



James Hendler *ist Informatikprofessor an der Universität von Maryland in College Park, wo er sich seit mehreren Jahren auf Wissensdarstellung im Web konzentriert. Zusammen mit seinen Doktoranden entwickelte er SHOE (Simple HTML Ontology Extensions), die erste webgestützte Expertensystemsprache, um die vielen Fähigkeiten der in diesem Artikel beschriebenen Agenten zu demonstrieren. Hendler ist ebenfalls verantwortlich für ein Projekt zum Thema agentengestützte Computertechnik der Agentur DARPA des amerikanischen Verteidigungsministeriums.*



Ora Lassila *ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Nokia-Forschungszentrum in Boston und Mitglied des W3C-Beratungsgremiums. Die großen Schwierigkeiten bei der Entwicklung von Agenten und der Automatisierung des Webs veranlassten ihn, an der Festlegung des Standards RDF innerhalb des W3C mitzuwirken; RDF dient als Grundlage vieler Projekte für das semantische Netz.*

Die Stresssignale der Pflanzen

Bei Stress geben Pflanzen oft große Mengen flüchtiger Stoffe ab. Diese können über komplexe Reaktionsschleifen auf sie selbst zurückwirken. Bestes Beispiel ist das Ozon.

Von Jürgen Wildt, Peter Rockel und Erwin Lausch

Ah, dieser Kieferndurft! Wenn die Sonne in einer Hitzeperiode ausdauernd scheint, riechen Nadelwälder besonders intensiv „nach Harz“, wie viele Laien meinen. In Wahrheit sind es leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe aus der Klasse der Terpene, die den würzigen Wohlgeruch hervorrufen. Und das besonders intensive Aroma, das uns erfreut, entströmt den Bäumen oft aus eher unerfreulichem Anlass: Sie haben Stress.

Ähnlich fragwürdig ist der menschliche Riechgenuss beim Rasenmähen, wenn das geschnittene Gras einen Duft verströmt, der uns angenehm frisch erscheint. Hinter dem Geruch stecken hier spezielle Alkohole, die bei der Zerstörung der Zellmembranen freigesetzt werden.

Aber auch ohne schädliche äußere Einflüsse geben viele Pflanzen flüchtige Substanzen an die Luft ab. Das erfahren schon Kleinkinder, wenn ihnen eine Blume zum Riechen unter die Nase gehalten wird. Solche Duftstoffe dienen als Lockmittel für Insekten, damit diese die Blüten besuchen und sie dabei nolens volens bestäuben.

Noch auf vielerlei andere Weise verschaffen sich Pflanzen einen Vorteil durch den Einsatz flüchtiger Verbindungen. Schon im ersten Jahrhundert berichtete der römische Gelehrte Plinius der Ältere, dass in der Umgebung von Walnussbäumen andere Pflanzen nicht recht gedeihen, und er führte das auf Ausdünstungen der Bäume zurück. Fachleute kennen heute zahlreiche Fälle von „Allelopathie“, in denen Pflanzen sich durch Ausscheidung wachstumshemmender oder auch -fördernder Substanzen gegenseitig beeinflussen.

Im Überlebenskampf gilt es aber auch, sich gegen Angreifer zu wehren. Als Folge einer Infektion produzieren Pflanzen deshalb antibiotisch wirkende Abwehrstoffe oder Phytoalexine, die das Wachstum von Pilzen und Bakterien hemmen. Andere flüchtige Substanzen dienen dem Schutz vor Insektenfraß. Manche Pflanzen haben dabei eine besonders raffinierte Abwehrstrategie entwickelt: Sie produzieren Stoffe, die Insekten daran hindern, geschlechtsreif zu werden. Solche oft flüchtigen „Juvenilhormone“ können bei einem Schädlingsbefall in erheblichen Mengen freigesetzt werden. So nebeln sich befallene Kiefern mit einem Stoff namens α-Farnesen regelrecht ein.

Mittels flüchtiger Substanzen können sich Pflanzen sogar gegenseitig „warnen“. So kurbeln im Falle der Eichen auch gesunde Bäume die Produktion von Abwehrstoffen gegen Raupenfraß an, wenn sie in Windrichtung von befallenen stehen. Es findet also ein Informationsfluss statt, den chemische Verbindungen über die Luft vermitteln.

Alles in allem geht der Stoffaustausch zwischen Vegetation und Atmosphäre in die Milliarden Tonnen jährlich. Den wichtigsten Beitrag leistet die Photosynthese, bei der die Pflanzen Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe der Sonnenenergie zu Kohlenhydraten verarbeiten. Schätzungsweise 200 bis 300 Milliarden Tonnen CO_2 nehmen sie so weltweit jährlich aus der Luft auf. Zum Ausgleich geben sie Sauerstoff ab, der bei der Photosynthese als Nebenprodukt anfällt und als lebenswichtiges Atemgas für Mensch und Tier dient.

In die Schlagzeilen geriet der Stoffaustausch zwischen Pflanzen und Atmosphäre im letzten Jahrzehnt durch ein Phänomen, das

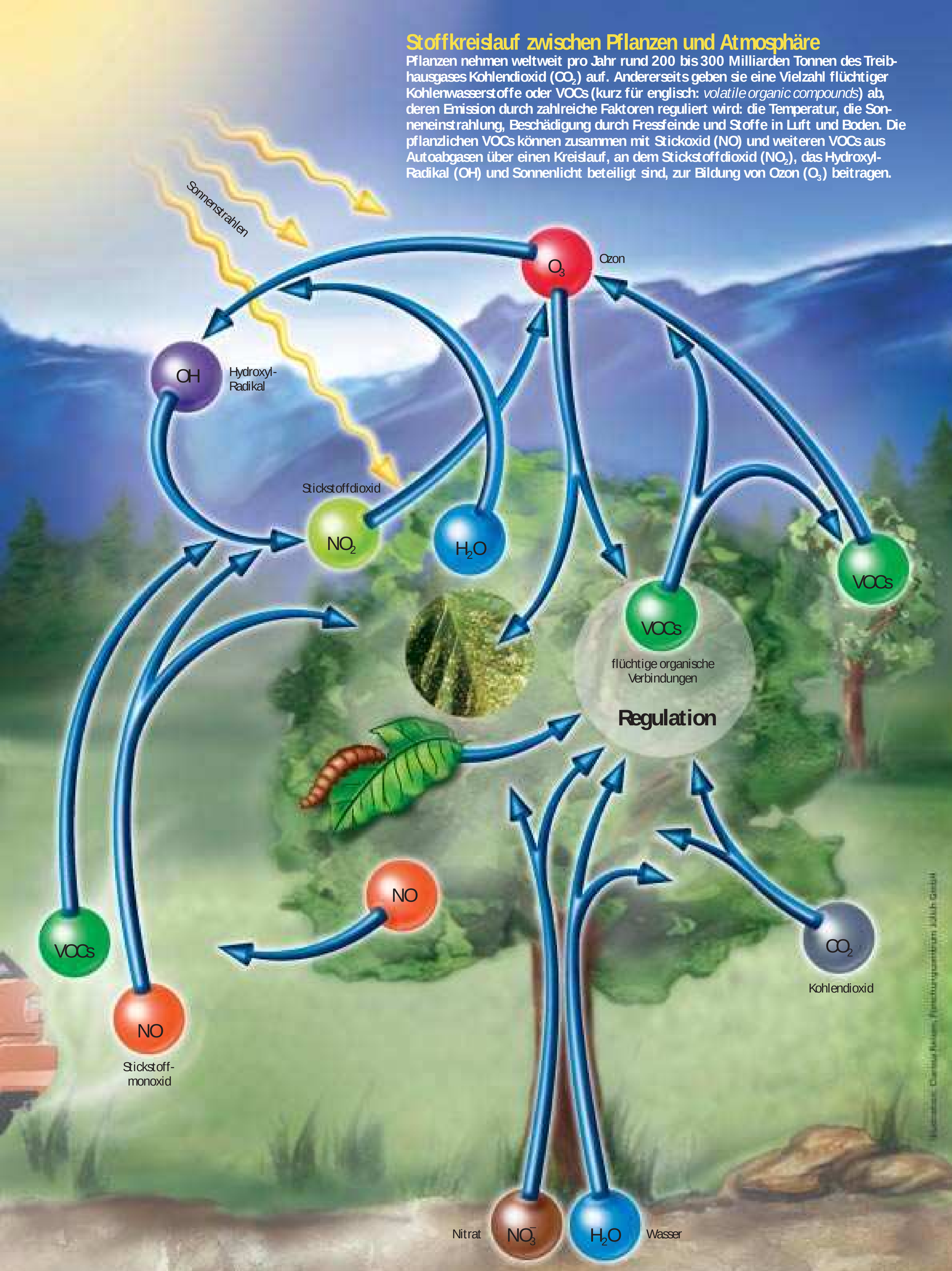


FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

In mannshohen, hermetisch gegen die Außenluft abgeschlossenen Glasbehältern werden im Forschungszentrum Jülich die Reaktionen von Pflanzen auf äußere Einflüsse untersucht.

Stoffkreislauf zwischen Pflanzen und Atmosphäre

Pflanzen nehmen weltweit pro Jahr rund 200 bis 300 Milliarden Tonnen des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2) auf. Andererseits geben sie eine Vielzahl flüchtiger Kohlenwasserstoffe oder VOCs (kurz für englisch: *volatile organic compounds*) ab, deren Emission durch zahlreiche Faktoren reguliert wird: die Temperatur, die Sonneneinstrahlung, Beschädigung durch Fressfeinde und Stoffe in Luft und Boden. Die pflanzlichen VOCs können zusammen mit Stickoxid (NO) und weiteren VOCs aus Autoabgasen über einen Kreislauf, an dem Stickstoffdioxid (NO_2), das Hydroxyl-Radikal (OH) und Sonnenlicht beteiligt sind, zur Bildung von Ozon (O_3) beitragen.



nur indirekt damit zu tun hat: den Sommersmog. Dabei bilden sich – in erster Linie verursacht durch Emissionen von Kraftfahrzeugen – in Bodennähe große Mengen des gesundheitsschädlichen Reizgases Ozon. Nun tragen Pflanzen tatsächlich einerseits entscheidend zu diesem Vorgang bei, indem sie wichtige Vorprodukte dafür liefern. Andererseits entziehen sie jedoch der Atmosphäre erhebliche Mengen an Ozon: schätzungsweise zwischen 500 und 800 Millionen Tonnen jährlich. Dabei werden sie allerdings selbst geschädigt und geben als Folge davon ähnliche Stoffe ab wie bei einem Angriff von Insekten oder Bakterien. Fatalerweise können daraus wiederum Rückkopplungen entstehen, welche die Ozonbildung weiter verstärken.

Heikle Wechselwirkung zwischen Pflanzen und Ozon

Über die jeweils aufgenommenen und abgegebenen Gasmengen vermögen Hochrechnungen nur grobe Anhaltspunkte zu liefern, solange die Reaktionen der Pflanzen auf unterschiedliche Bedingungen – Reaktionen, die zudem zwischen den einzelnen Arten variieren – nicht genauer bekannt sind. Diese Beziehungen zu untersuchen, hat sich unsere Arbeitsgruppe am Forschungszentrum Jülich in einer Kooperation zwischen Atmosphärenchemikern und Biologen zum Ziel gesetzt.

Begonnen haben wir unsere Arbeiten 1986 unter dem Eindruck der Debatte über das so genannte „Waldsterben“. In der Diskussion spielten Stickoxide aus anthropogenen Emissionen eine bedeutende Rolle. Deshalb wollten wir herausfinden, wie sich Stickstoffmonoxid (NO), das größtenteils aus Verbrennungsprozessen insbesondere in Kraftfahrzeugmotoren stammt, auf Pflanzen auswirkt. Diese nehmen das Gas in erheblichen Mengen durch die Blätter auf, geben es in geringerem Ausmaß aber auch ab. Wir kamen bald zu dem Schluss, dass es nicht sinnvoll ist, diese Emissionen isoliert zu betrachten. NO wird in der Atmosphäre in andere Stickstoffverbindungen umgewandelt, so in Salpetersäure, die den Regen sauer macht und zugleich den Boden düngt. Vor allem aber: Es ist entscheidend an der Bildung von Ozon in der unteren Atmosphäre, der Troposphäre, beteiligt.

So segensreich sich die Ozonschicht in 20 bis 30 Kilometer Höhe für das Leben auf der Erde auswirkt, weil sie dort den größten Teil der für Erdbewohner besonders gefährlichen UV-Strahlung aus dem Sonnenlicht herausfiltert, so wenig willkommen ist das Gas in Bodennähe. In Konzentrationen über 200 Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu g/m^3$) Luft, wie sie an sonnigen Sommertagen immer wieder auftreten, kann Ozon die Gesundheit von Mensch und Tier beeinträchtigen und belastet die Vegetation. Das machte den durch Ozon ausgelösten Sommersmog zum umweltpolitischen Reizthema, auch wenn sich der Verdacht, dass Ozon Hauptverursacher des Waldsterbens sei, letztlich nicht bestätigte.

Durch menschliche Aktivitäten gelangen viel mehr Stickoxide in die Luft als durch die Vegetation. Insofern ist der Sommersmog eindeutig anthropogen, ein Phänomen unserer Zeit. Die Pflanzen geben nur dann NO ab, wenn dessen Konzentration in der Luft unterhalb von etwa 2 $\mu g/m^3$ liegt. Oberhalb dieses Wertes – in industrialisierten Gebieten der Normalfall – nehmen sie das Gas dagegen durch die Blätter auf.

Anders verhält es sich allerdings bei den flüchtigen organischen Verbindungen oder VOCs (kurz für englisch: *volatile organic compounds*), dem zweiten wichtigen Ausgangsprodukt für die Bildung von Ozon. Unter diesem Begriff werden zahlreiche Kohlenstoffverbindungen zusammengefasst, hauptsächlich Kohlenwasserstoffe, aber auch chemisch verwandte Substanzen. Davon liefert die Vegetation riesige Mengen: nach groben Schätzungen weltweit etwa eine Milliarde Tonnen pro Jahr, was gut zehnmal mehr ist als die anthropogenen VOC-Emissionen (Kasten unten). Sie leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Ozonbildung. Zwar ist in Ballungsräumen der starke Verkehr die Hauptquelle für VOCs. In nicht industrialisierten Regionen jedoch stammt der größte Teil der Emissionen von Pflanzen. Wird NO-haltige Luft aus den Ballungsgebieten in das Umland transportiert, können pflanzliche VOCs die Ozonbildung aufrechterhalten, ja sogar verstärken.

Dabei kommt es zu einem komplizierten Kreislauf. Vereinfacht dargestellt, reagieren VOCs mit Hydroxyl-Radikalen (OH), dem „Waschmittel“ der Atmosphäre. Sie selbst werden dadurch schrittweise abgebaut, während aus den OH-Radikalen so genannte Peroxy-Radikale entstehen. Diese wandeln Stickstoffmonoxid in Stickstoffdioxid (NO_2) um. Sonnenlicht spaltet das NO_2, sodass wieder NO entsteht sowie ein einzelnes Sauerstoffatom, das sich mit „normalem“, zweiatomigem Sauerstoff (O_2) der Atmosphäre zu Ozon (O_3) vereinigt. Auch Ozon wird schließlich vom Licht gespalten. Das abgetrennte O-Atom kann unter anderem mit Wasser (H_2O) reagieren; heraus kommen zwei OH-Radikale, das Waschmittel ...

Was Pflanzen in die Luft schicken

Pflanzen sind kleine Fabriken für flüchtige organische Verbindungen (englisch: *volatile organic compounds*, abgekürzt VOCs). Die Anzahl der an die Luft abgegebenen Substanzen erscheint unüberschaubar. Jeder von Pflanzen ausgehende Geruch beruht auf mindestens einer freigesetzten Molekülsorte, aber längst nicht alle flüchtigen Substanzen werden von unserer Nase wahrgenommen. Untersuchungen haben ergeben, dass eine einzelne Pflanze ohne Stress 40 bis 50 flüchtige Stoffe ausdünstet, unter Stress jedoch 300 bis 400. Bei Belastung nehmen auch die abgegebenen Mengen stark zu.

Hier sind die wichtigsten Verbindungen und Substanzklassen unter den VOCs:

➤ **Isopren (C_5H_8)**, der Grundbaustein des Rohkautschuks, wird auch von vielen Pflanzen in größeren Mengen produziert und verbreitet, die keinen Kautschuk erzeugen. Die physiologische Bedeutung dieser Massenproduktion ist noch unbekannt. Die globale Emission wird auf 200 bis 450 Millionen Tonnen pro Jahr geschätzt.

➤ **Monoterpene ($C_{10}H_{16}$)** bestehen aus jeweils zwei Isopren-Einheiten. Beispiele sind a-Pinen, Myrcen, Limonen. Auch ihre physiologische Bedeutung ist noch ungeklärt. Geschätzte globale Emission: 100 bis 350 Millionen Tonnen pro Jahr.

➤ **Sesquiterpene ($C_{15}H_{24}$)** enthalten jeweils drei Isopren-Einheiten. Beispiele sind ß-Caryophyllen und Alloaromadendren. Sie dienen unter anderem als Abwehrstoffe gegen Schädlinge.

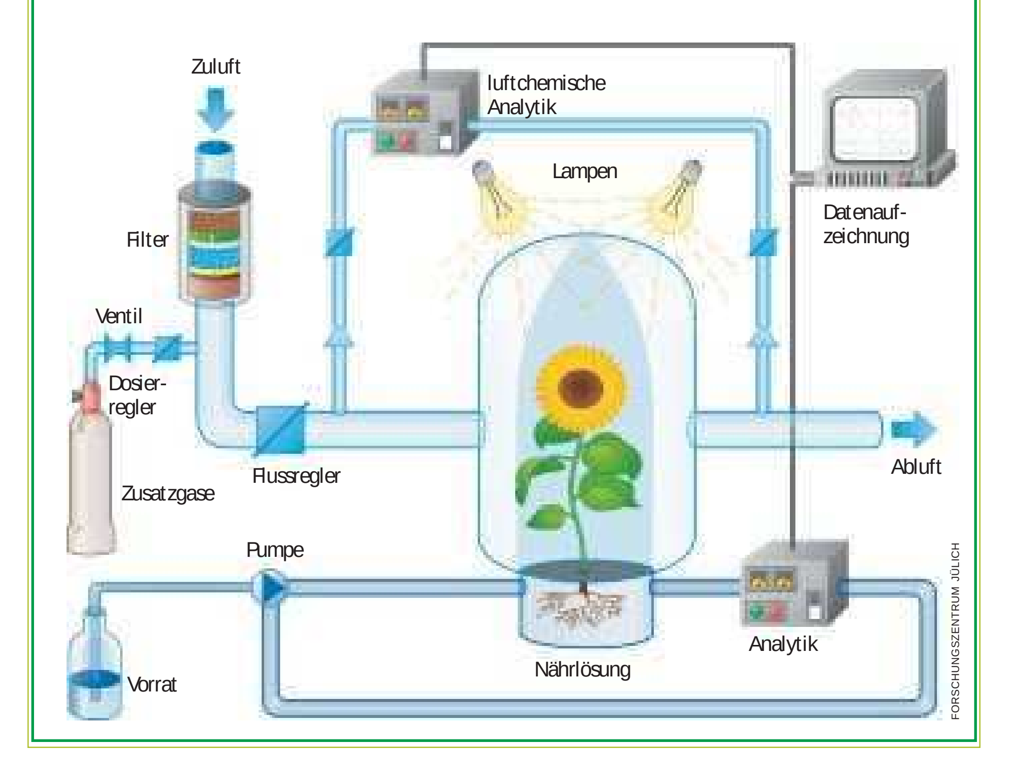
➤ **Ethen (Äthylen, C_2H_4)** hat mannigfache Funktionen als Pflanzenhormon, etwa bei der Fruchtreife. Globale Emission: bis 70 Millionen Tonnen pro Jahr.

➤ **Blattalkohole** sind hauptsächlich Substanzen mit 6 Kohlenstoff-Atomen. Diese C_6-Verbindungen werden nach der Zerstörung von Zellmembranen aus freien Fettsäuren gebildet. Ein Beispiel für einen Blattalkohol ist Hexenol, der als Abwehrstoff eine Rolle spielt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass Ozon in der Troposphäre immer dann gebildet wird, wenn VOCs, Stickoxide und Licht vorhanden sind. Fehlt einer dieser Faktoren, wird es abgebaut. Starke Sonnenstrahlung und die richtige Mischung von Stickoxiden und VOCs hingegen heizen die Ozonbildung regelrecht an. So kommt es zu den Sommersmog-Episoden. Dabei kann die Ozonkonzentration der Luft ein Vielfaches der durchschnittlichen Werte erreichen und im Extremfall 300 µg/m³ übersteigen.

Pflanzen auf dem Prüfstand

In der Expositionskammer, die kontinuierlich mit gereinigter Luft durchspült wird, lassen sich unter genau kontrollierten Bedingungen Aufnahme und Abgabe von Gasen durch Pflanzen ermitteln. Lichtintensität, Temperatur, Zufuhr von Wasser und Nährstoffen über die Wurzeln sowie die Konzentration von Gasen in der Umgebungsluft sind exakt einstellbar. Die Analyse der Abluft gibt dann Auskunft über die Art und Menge der emittierten oder aufgenommenen flüchtigen Substanzen.



Emissionstest in der Kammer

Im Einzelnen schwanken die pflanzlichen VOC-Emissionen je nach Spezies und Umweltbedingungen. Um den Sommersmog besser zu verstehen, bedarf es somit tieferer Einsichten in die Prozesse, die für diese Emissionen verantwortlich sind und sie steuern. Wir untersuchten daher, unter welchen Bedingungen bestimmte Testpflanzen welche VOCs in welchen Mengen an die Atmosphäre abgeben und wie sich einzelne Umweltfaktoren auf die Emissionen auswirken: Temperatur, Lichtintensität und Stress verschiedener Art, darunter Nährstoff- und Wassermangel, Verletzung und insbesondere auch eine Belastung durch Ozon.

Um den Stoffaustausch zwischen Pflanzen und Atmosphäre unter streng kontrollierten Bedingungen zu beobachten, haben wir in einer Halle auf dem Gelände des Forschungszentrums einen technisch höchst aufwändigen Versuchsaufbau eingerichtet. Kernstück der von uns „Vegatron“ getauften Anlage sind drei Expositionskammern, in denen Versuchspflanzen einer genau definierten Umgebung ausgesetzt werden können. In mannshohen Glasbehältern sind sie dort von der Umgebung abgekapselt. Die zugeleitete Luft wird vor Eintritt in die Kammer auf die enthaltenen Spurenstoffe, insbesondere VOCs, Stickoxide und Ozon, analysiert, gereinigt und je nach Fragestellung des Experiments mit den nötigen Ingredienzien angereichert. Ebenso analysieren wir natürlich die aus der Kammer ausströmende Luft.

Zwölf Lampen von je 400 Watt lassen sich nach Bedarf einzeln schalten. Lichtintensität und Temperatur werden unabhängig voneinander geregelt. Damit wir die Einflüsse des Ernährungszustandes auf die pflanzlichen Emissionen bestimmen können, sind auch die Konzentrationen der Stoffe in der wässrigen Nährlösung einzeln einstellbar.

Um die Kammern herum befinden sich ein Dutzend Messplätze. Ein Besucher, der die Halle betritt, stößt auf ein verwirrendes Arrangement aus Rohren und Schläuchen, Gasflaschen, Heiz- und Kühlaggregaten, Schaltkästen und Kontrollanzeigen sowie elektronischen Geräten, PCs und Monitoren, das in seinen Ausmaßen die Kammern mit den Pflanzen beträchtlich übertrifft.

Bei unseren ersten Experimenten zu den VOC-Emissionen bestätigten gaschromatografische Analysen, dass einige Substanzen von fast allen Pflanzenarten abgegeben werden. Dazu gehören Isopren und Monoterpene; das sind Kohlenwasserstoffe mit fünf beziehungsweise zehn Kohlenstoff-Atomen.

Isopren, der Grundbaustein des Kautschuks und vieler anderer Naturstoffe, ist die wohl bekannteste und am längsten untersuchte flüchtige organische Verbindung. Es wird aus dem aufgenommenen Kohlendioxid schnell synthetisiert und kann ebenso rasch in die Atmosphäre abgegeben werden. Die Isopren-Emissionen hängen, wie die Aufnahme von CO_2 in das Blatt, von der Temperatur und der Lichtintensität ab. Einige Pflanzenarten scheiden die Verbindung in großen Mengen aus – im Extremfall gelangen über zehn Prozent des Kohlenstoffs, der als CO_2 aufgenommen wurde, schon bald wieder als Isopren ins Freie.

Auch die aus zwei Isopren-Einheiten zusammengesetzten Monoterpene entströmen vielen Gewächsen, vor allem Nadelbäumen, in großen Mengen. Sie sind dort in den Harzkanälen der Nadeln gespeichert. Über zehn Prozent der Trockenmasse einer Kiefernnadel bestehen aus Monoterpenen, die den typischen Geruch verbreiten, wenn man eine Kiefern- oder Fichtennadel zerbricht.

Warum synthetisieren die Pflanzen diese Substanzen unter enormem Energieaufwand und geben sie in solchen Mengen in die Atmosphäre ab? Über die Antwort ist wenig bekannt. Gewiss sind unter den Lockstoffen für bestäubende Insekten auch Monoterpene. Aber das kann nur ein Nebeneffekt sein, denn solche Pflanzen, die statt durch Insekten durch den Wind bestäubt werden, sondern ebenfalls reichlich Monoterpene ab. Rätselhaft erscheint zudem die geradezu verschwenderisch anmutende Vorratshaltung einiger Arten.

Wie unsere Untersuchungen zeigten, können äußere Faktoren die abgegebenen Mengen an Monoterpenen und anderen ▶

VOCs enorm beeinflussen. Beim Erwärmen um nur ein Grad Celsius stiegen die Emissionen um bis zu 20 Prozent. Eine Temperaturabhängigkeit hatten wir erwartet; denn die VOCs werden um so schneller mit dem Transpirationsstrom durch die Spaltöffnungen nach außen transportiert, je höher ihr Dampfdruck ist – und dieser nimmt mit der Temperatur zu. Doch die Steigerungsraten lagen weit über denen des Dampfdrucks, so dass es sich nicht um einen rein physikalischen Prozess handeln kann.

Auch intensivere Beleuchtung kurbelte die Emissionen an; allerdings galt das bei den einzelnen Substanzen in sehr unterschiedlichem Maße. So waren die Emissionsraten bei manchen Monoterpenen auch im Dunkeln schon ziemlich hoch, bei anderen hingegen noch kaum messbar.

Auf Nährstoff- und Wassermangel reagierten die Pflanzen gleichfalls sehr unterschiedlich. Sonnenblumen etwa steigern ihre Emissionen an Monoterpenen innerhalb weniger Tage auf das Zehnfache, wenn der Stickstoff knapp wird. Bei Raps ist die Wirkung dagegen deutlich schwächer. Kiefern schließlich lassen kurzfristig überhaupt keine Reaktion erkennen. Ganz ähnlich verhält es sich bei Wassermangel: Sonnenblumen sprechen schnell und heftig darauf an, Kiefern bleiben hingegen längere Zeit unbeeindruckt.

In die Höhe schoss die Abgabe von Monoterpenen auch bei mechanischer Beanspruchung – etwa durch Berühren der oberen Blätter oder durch einen laufenden Ventilator; dasselbe galt für Verletzungsstress durch Abschneiden eines Blattes. Allerdings fielen die Werte innerhalb weniger Stunden vom steilen Gipfel wieder ab – selbst wenn der Ventilator weiter lief. Die Emissionsraten von Isopren hingegen blieben die ganze Zeit über konstant.

Schließlich setzten wir verschiedene Versuchspflanzen – Sonnenblumen, Raps und Kiefern, diverse Tabaksorten, Tomaten und Mais – Ozon aus. Die Ergebnisse waren spektakulär. Danach können die gesamten VOC-Emissionen während oder nach einer starken Ozonbelastung auf mehr als das 1000fache emporschnellen. Dies liefert dem Sommersmog reichlich Nahrung. So kann sich aus den unter Ozon-Einfluss abgegebenen VOCs, ausreichend Stickoxide und Sonnenlicht vorausgesetzt, sogar mehr Ozon bilden, als die Pflanzen aus der Atmosphäre herausgefiltert haben.

Wie wir feststellten, wirkt das Gas nicht durch äußerlichen Kontakt, sondern erst nachdem es durch die Spaltöffnungen in das Blatt eingedrungen ist. Dann aber ruft es schon in geringen Konzentrationen ähnliche Reaktionen hervor wie der Angriff von Insekten, Pilzen oder Bakterien. Außer Monoterpenen gaben die Pflanzen dabei auch langkettige Aldehyde wie Oktanal und Nonanal ab, die nach der Spaltung durch Sonnenlicht in der Atmosphäre ebenfalls zur Ozonbildung beitragen können.

Ihre Emission beginnt schon bei Ozon-Gehalten von 20 bis 30 μg/m³ Luft – weit unterhalb der Sommersmog-Konzentrationen von etwa 200 μg/m³ – und steigt mit zunehmendem Anteil des Reizgases auf ebenso hohe Werte wie bei starkem Schädlingsbefall. Wie entstehen sie? Denkbar wäre eine direkte Reaktion des ins Blattinnere eingedrungenen Ozons mit Fettsäuren. Dagegen spricht jedoch, dass auch Schädlinge und Krankheiten ganz ohne Ozon zur Absonderung der Aldehyde führen. Diese entstehen deshalb wohl eher auf enzymatischem Wege.

Bei hoher Belastung mit Ozon werden weitere flüchtige Substanzen emittiert – darunter Blattalkohole, oft auch C_6-Verbindungen genannt. Zugleich erscheinen an den Blättern Nekrosen: Flecke aus abgestorbenem Gewebe (Bild rechts). Die Schwellenwerte für die Ozonkonzentrationen, die diese Reaktionen auslösen, sind für unterschiedliche Pflanzenarten recht verschieden. Mais- und Tomatenpflanzen etwa geben die C_6-Verbindungen erst nach mehrstündiger extremer Ozonbelastung ab. Dagegen reagieren besonders empfindliche Tabaksorten schon bei 120 μg/m³, einer Konzentration, die heutzutage öfter auftritt.

Ungeeigneter Abwehrversuch

Die Emissionen von C_6-Verbindungen scheinen unabhängig von der jeweiligen Pflanze und der Art der Belastung zu sein. In einer unspezifischen Stressreaktion läuft immer die gleiche Enzymkaskade ab. Wie erklärt sich diese überraschende Übereinstimmung? Es gibt dafür zumindest eine einleuchtende Hypothese. Ozoneinwirkung und Schädlingsbefall führen beide zur Zerstörung von Zellmembranen. Als Reaktion darauf aktiviert die Pflanze eine Sequenz von Enzymen, die dafür sorgt, dass das Blattgewebe im Umkreis der Beschädigung abstirbt. Das entstehende tote Pflanzenmaterial schützt vor einem weiteren Vordringen von Bakterien oder Pilzen. Die Emissionen der C_6-Verbindungen sind schlicht Nebenprodukte dieses Abwehrmechanismus.

Ozon in den hohen Konzentrationen, wie sie bei Sommersmog auftreten, stellt für die Pflanzen eine neuartige Herausforderung dar. Sie begegnen ihr mit einem altbewährten Mechanismus, der sie in den Unbilden des Pflanzenlebens oft vor dem Schlimmsten bewahrt. Mit ihm schaffen sie es, Infektionen durch unzählige Pilze und Bakterien zu überstehen, sich gegen schätzungsweise 300 000 Insektenarten, die sich von Pflanzen ernähren und dabei Blätter beschädigen, zu behaupten sowie mit Verletzungen aus vielfältigen anderen Ursachen fertig zu werden. Gegen Ozon nützt er freilich nichts – im Gegenteil: Die Pflanze vermehrt dadurch nur den erlittenen Schaden.

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Die Spaltöffnungen der Blätter bestimmen mit ihrer variablen Weite die Aufnahme des lebensnotwendigen Kohlendioxids. Aber auch Substanzen wie NO, NO_2, Ozon oder VOCs werden über sie aufgenommen oder abgegeben. Der Gasaustausch durch die Kutikula ist sehr viel geringer.

Literaturhinweise

Jasmonsäure- und Coronatin-induzierte Duftproduktion in Pflanzen. Von W. Boland et al. in: Angewandte Chemie, Bd. 107, S. 1715 (1995).

Emission of volatile organic compounds from ozone-exposed plants. Von A. C. Heiden et al. in: Ecological Applications, Bd. 9, S. 1160 (1999).

De Novo Biosynthesis of Volatiles Induced by Insect Herbivory in Cotton Plants. Von P. W. Pare und J. H. Tumlinson in: Plant Physiology, Bd. 114, S. 1161 (1997).

Der Anstieg der Emissionen bei starkem Stress läuft zeitlich immer nach dem gleichen Schema ab: Zuerst werden die C_6-Verbindungen emittiert, erst einige Zeit später klettern auch die Monoterpen-Emissionen über die Normalwerte. Die Biosynthese dieser Stoffklasse verläuft dabei völlig anders als die der C_6-Verbindungen. Dennoch legt die zeitlich gekoppelte Abgabe von beiden den Gedanken nahe, dass zwischen den Biosynthesewegen für die verschiedenen VOC-Gruppen eine Verbindung besteht.

Wie könnte sie aussehen? Schon im Jahre 1995 hat eine Arbeitsgruppe um Wilhelm Boland, damals an der Universität Bonn, heute am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena, eine Antwort auf diese Frage vorgeschlagen. Danach wird ein Vorläufer-Molekül der C_6-Verbindungen, die 13-(S)-Hydroxylinolensäure, in der Pflanze zu Jasmonsäure umgewandelt. Diese wirkt dann als Signalmolekül, das unter anderem die Biosynthese und Emission von Monoterpenen beschleunigt. Belege dafür lieferten Experimente, bei denen Bolands Arbeitsgruppe Versuchspflanzen gasförmigem Methyljasmonat in der Umgebungsluft aussetzte. Dessen Aufnahme veranlasste die Pflanzen, mehr Jasmonsäure zu produzieren, was wiederum die Monoterpen-Emissionen steigerte.

Methyljasmonat wirkt demnach als Signalsubstanz, die schon in sehr geringen Mengen eine starke Reaktion auslöst. Bei einer Konzentration von nur 0,005 $\mu g/m^3$ in der Umgebungsluft lässt es die Monoterpen-Emissionen aus Kiefern drastisch ansteigen: Die Menge der emittierten Terpene ist dabei 1000-mal größer als die des aufgenommenen Methyljasmonats. Kleine Ursache, große Wirkung.

Dennoch hat die Theorie von Boland und seinem Team einen Haken: Wie Versuche bei uns in Jülich ergaben, tritt nach der Begasung von Kiefern mit Methyljasmonat ein deutlich anderes Emissionsspektrum auf als beim Befall mit Insekten oder Bakterien oder bei hohen Ozonkonzentrationen.

Generell können unterschiedliche Stressfaktoren zu unterschiedlichen Terpenmustern führen. Das demonstrierten schon 1997 Paul W. Pare und James H. Tumlinson vom Center for Medical, Agricultural and Veterinary Entomology in Gainesville (Florida). Ihre Versuche ergaben, dass Baumwollpflanzen bei rein mechanischer Verletzung nur unmittelbar gespeicherte Terpene freisetzen, aber keine späteren Reaktionen mehr zeigen. Nach Raupenbefall verbreiten sie dagegen einige Stunden später andere VOCs, darunter auch aus drei Isopren-Einheiten bestehende Sesquiterpene. Diese werden nach der Attacke frisch synthetisiert; als Auslöser fungieren dabei Stoffe im Speichelsekret der Raupen. Auch wenn die Bedeutung der VOCs für uns vielfach noch im Dunkeln liegt, lassen solche Ergebnisse immerhin erahnen, dass ihre Abgabe im Überlebenskampf der Pflanzen sehr wohl eine wichtige Rolle spielen muss.


FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Die hellen Flecke auf diesen Tabakblättern sind abgestorbene Bereiche (Nekrosen), hervorgerufen durch Ozon. Die Pflanzen reagieren auf das aggressive Gas ähnlich wie auf Bakterien- oder Pilzbefall: Rund um die Infektionsherde stirbt Gewebe ab und bildet einen Wall gegen das weitere Vordringen des vermeintlichen Schädlings.

Weshalb aber, fragten wir uns, produzieren Pflanzen das Stickstoffmonoxid, mit dem unsere Untersuchungen begannen? In tierischen Geweben übt NO als Signalmolekül vielerlei regulatorische Funktionen aus, so bei der Erweiterung der Blutgefäße, bei der Signalübertragung im Gehirn und bei der Immunreaktion zur Abwehr von Viren und Bakterien. In Pflanzen könnte es gleichfalls als Signalmolekül zum Schutz gegen Krankheitserreger fungieren. Belegen ließ sich das bislang freilich nicht.

NO und die Pflanzen: ein typisches Beispiel für schwierig zu quantifizierende Verhältnisse. Pflanzen produzieren NO nur selbst, wenn sie nicht zu knapp, aber auch nicht zu üppig mit Stickstoff versorgt sind. Zudem nehmen sie es aus der Atmosphäre auf; ist die Konzentration in der Luft aber gering, geben sie das Gas ab. Wachsen Pflanzen in stark verschmutzter Luft, bedienen sie sich besonders reichlich. Sie nehmen dann sehr viel mehr NO auf, als sie in sauberer Luft freisetzen. Den enthaltenen Stickstoff können sie genauso verwerten und in pflanzliche Substanz einbauen wie Stickstoff, den sie sich über die Wurzeln einverleibt haben. Eine toxische Wirkung des aufgenommenen NO scheint daher eher unwahrscheinlich.

Ob das Gas auch Signalwirkungen ausübt, ist noch eine offene Frage. Da NO wegen seiner hohen Reaktivität sehr schnell abgebaut wird, ist bislang nicht einmal sicher, dass seine Aufnahme aus der Luft die durch pflanzliche Eigenproduktion verursachte NO-Konzentration wesentlich erhöht.

So bestimmen noch immer zahlreiche Ungewissheiten das Bild, das wir uns von den engen Beziehungen zwischen Pflanzen und Atmosphäre machen – kein Wunder angesichts der höchst verwickelten Verhältnisse. Auch die Ergebnisse unserer Versuche in der Klimakammer liefern nur Auskünfte über einzelne Faktoren. Wie aber soll man deren Einflüsse auf größere Gebiete oder gar ganze Kontinente hochrechnen? Eine flächenhafte Erfassung von Stress für eine Pflanzenart, geschweige denn für ganze Ökosysteme erscheint vorerst illusorisch. Bis wir auch nur einigermaßen fundierte Hochrechnungen über den Stoffaustausch zwischen Pflanzen und Atmosphäre, dieses unübersichtliche Geben und Nehmen, anstellen können, ist es noch ein weiter Weg. Angesichts der enormen ökologischen Bedeutung des Themas aber lohnt es sich, ihn zu gehen.

***Jürgen Wildt** untersucht am Institut für Chemie der Belasteten Atmosphäre des Forschungszentrums Jülich die Wechselwirkung zwischen Vegetation und Atmosphäre. Er hat an der Universität Bonn Physik studiert, 1979 promoviert und sich 1987 habilitiert. **Peter Rockel** leitet die Arbeitsgruppe Pflanzenphysiologie am Institut für die Biologie des Stoffaustauschs in Jülich. Er hat an der Universität Bochum Biologie studiert und 1993 an der Universität Essen promoviert. **Erwin Lausch** ist promovierter Biologie und freier Wissenschaftsjournalist in Ahrensburg.*


STEVEN ADAMS, AP PHOTO

Die Kunst, Menschen zu beeinflussen

Gratisproben tragen ein unsichtbares Preisschild: Der Beschenkte fühlt sich in der Schuld. Hier gibt es Kostproben eines neuen Produkts – grünes Ketchup. Die ungewohnte Farbe erweckt auch den Eindruck eines knappen Gutes – ein zusätzlicher Kaufanreiz.

Verkäufer, Politiker, Freunde, Familienmitglieder – jeder möchte uns in seinem Sinne manipulieren. Sozialpsychologen können immer besser erklären, mit welchen Mitteln sich Menschen überzeugen, verleiten oder überreden lassen.

Von Robert B. Cialdini

Soziale Einflussnahme erforschen Psychologen seit ungefähr einem halben Jahrhundert. Besonders der Zweite Weltkrieg mit seinen Nachrichtenmaschinerien und Propagandakampagnen regte solche Studien an.

Zu den spannenden Fragen dieser Forschungsrichtung gehört aber auch, wie ein einzelner Mensch das Denken und Handeln von jemand anderem beeinflussen kann. Ich selbst bewege mich auf diesem Feld der Sozialpsychologie nun seit dreißig Jahren. Dabei interessiert mich besonders, was Menschen dazu bringt, sich von einem Ansuchen oder einer Aufforderung umstimmen zu lassen – welche Umstände darauf Einfluss haben, ob sie einem Ansinnen oder einer Bitte nachkommen.

Meines Erachtens lassen sich dabei sechs Hauptkomplexe erkennen. Diese menschlichen Grundtendenzen spielen im Geschäftsleben genauso mit wie auf gesellschaftlicher Ebene und in persönlichen sozialen Beziehungen. Um sie und ihre Macht zu wissen, gereicht uns deswegen in vieler Hinsicht zum Vorteil.

Reziprozität

Auf schriftliche Spendengesuche des amerikanischen Kriegsversehrtenbundes reagiert im Durchschnitt nicht einmal jeder fünfte Angeschriebene. Ist dem Brief jedoch ein kleines Geschenk beigefügt, in dem Fall einfach ein Satz persönlicher Adressetiketten, schicken fast doppelt so viele Personen der Organisation eine Spende. Wieso wirkt die ungebetene Gabe so stark? Hier wird ein ungeschriebenes Verhaltensgesetz

mächtig: der Codex der Gegenseitigkeit oder Reziprozität.

Wohl in allen menschlichen Gesellschaften gilt eine Norm, dass man auf die eine oder andere Weise zurückgeben muss, was einem gegeben wurde. Dieses Verhaltensmuster dürfte der evolutionäre Selektionsdruck sozialen Tieren wie unsereinem eingeprägt haben. Durch ein Geschenk – sogar ein vielleicht unerwünschtes – fühlen sich viele Menschen zu einer Gegenleistung gedrängt.

Nicht nur Wohltätigkeitsorganisationen nutzen das aus. Lebensmittelhändler offerieren Kostproben; Fitness-Studios bieten ein Probetraining an. Der Kunde lernt das Produkt oder die Dienstleistung kennen – und gerät psychisch in die Schuld des Anbieters. Nach dem gleichen Prinzip versuchen zum Beispiel Pharmafirmen unterschwellig Einfluss zu nehmen, indem sie etwa Wissenschaftler fördern oder an Ärzte Werbegeschenke ausgeben. In der Fachzeitschrift „New England Journal of Medicine“ erschien 1998 eine Studie über Bewertungen von so genannten Calcium-Blockern, Medikamenten, die einen bestimmten Zellmechanismus unterbinden. Von den Forschern, die in veröffentlichten Arbeiten Bedenken an den entsprechenden Wirkstoffen äußerten, hatten nur 37 Prozent zuvor von Herstellerfirmen eine Zuwendung erhalten. Aber unter denen, welche die Medikamente für unbedenklich hielten, befand sich keiner, der nicht von Firmen Forschungs- oder Reisegelder bekommen hatte oder dort beschäftigt war.

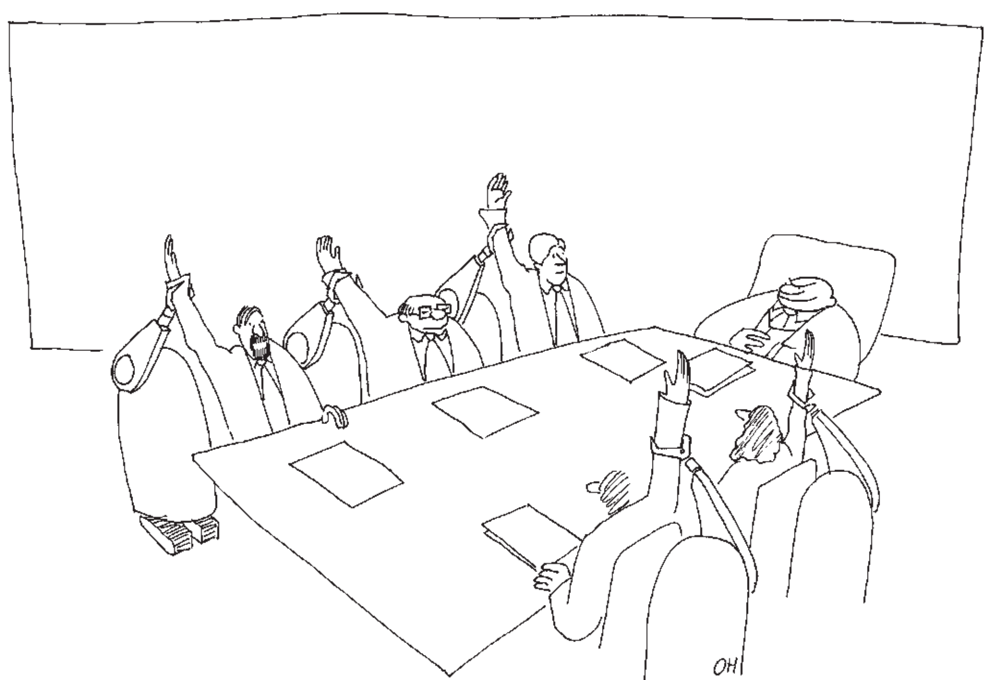
Das Prinzip der Gegenseitigkeit umfasst auch Zugeständnisse. Angenommen, Sie schlagen mir eine größere Bitte ab. Daraufhin ersuche ich Sie um einen kleinen Gefallen. Höchstwahrscheinlich werden Sie mir den jetzt erfüllen. Schließlich bin ich Ihnen gewissermaßen entgegengekommen, indem ich nur noch einen geringen Wunsch äußerte. Den mögen Sie mir nun nicht auch noch verweigern. Also kommen auch Sie mir jetzt entgegen.

Guten Tag, liebe Leser,

ich hoffe, bisher hat Ihnen dieses Heft gefallen. Mein Thema nun geht Sie persönlich an und betrifft auch Ihre Zukunft. Ist es Ihnen auch schon passiert, dass Sie etwas taten, was Sie gar nicht wollten, nur weil jemand Sie geschickt eingewickelt hat? Sind Sie auf einen Verkaufstrick hereingefallen? Oder haben Sie bei einer Sache mitgemacht, die Ihnen eigentlich etwas windig vorkam? Wahrscheinlich haben Sie sich nachher geärgert. Und Sie wollten schon immer wissen, warum Sie damals so blöd waren.

Fühlen Sie sich hiervon angesprochen? Dann sollten Sie meinen Artikel unbedingt lesen. Ich werde Ihnen die wirksamsten psychologischen Druckmittel aufzeigen, denen wir alle so leicht erliegen. Und ich stelle Ihnen dazu die allerneuesten Forschungsergebnisse vor. Sie erfahren auch die Hintergründe, weswegen Menschen so reagieren. Zögern Sie nicht! Nutzen Sie diese Möglichkeit und informieren Sie sich. Sie haben Ihr Interesse ja schon bekundet!

Wie gut das funktioniert, demonstrierten meine Kollegen und ich in den siebziger Jahren in einem Versuch auf der Straße. Wir fragten damals Passanten, ob sie bereit wären, Insassen von Jugendstrafanstalten auf einem Tagesausflug in den Zoo zu begleiten. Wie zu erwarten, ließen sich nur ziemlich wenige Leute darauf ein, gerade einmal jeder Sechste. Andere Passanten baten wir zunächst um einen viel aufwändigeren Gefallen: Würden sie sich den Insassen einer Jugendstrafanstalt ehrenamtlich zwei Jahre lang zwei Stunden pro Woche für Beratungen zur Verfügung stellen? Niemand der Angesprochenen war dazu bereit. Doch wir setzten nach: „Würden Sie aber eine Gruppe jugendlicher Strafgefangener auf einem Tagesausflug in den Zoo begleiten?“ Unser „Entgegenkommen“ verfehlte seine Wirkung nicht. Fast dreimal so viele Leute sagten jetzt zu, jeder Zweite der Angesprochenen.



Konsistenz

Vor einigen Jahren war Gordon Sinclair es leid. Wie die meisten Restaurantbesitzer erlebte er als Inhaber eines bekannten Chicagoer Lokals allzu oft, dass Leute telefonisch einen Tisch reservierten und dann nicht erschienen. Sinclair bat seine Rezeptionistin, ihren Standardspruch bei Reservierungen geringfügig zu ändern. Sie sollte nicht mehr sagen: „Geben Sie uns bitte Bescheid, falls Ihnen etwas dazwischenkommt.“ – sondern: „Würden Sie uns bitte Bescheid geben, falls Ihnen etwas dazwischenkommt?“ Dann sollte sie mit einer Pause höflich signalisieren, dass Sie eine Antwort erwartete, und die kam gewöhnlich auch. Von dem Tag an versetzten den Gastwirt zwei Drittel weniger Leute.

Das Geheimnis: Das Restaurant hatte den starken Drang der Menschen ange- ▶

sprochen, beständig zu sein und zuverlässig zu wirken. Gerade die kurze Pause nach der Frage war entscheidend, bewegte sie den Anrufer doch, gleichsam öffentlich „Ja“ zu sagen. Dergleichen empfinden Menschen wie eine eingegangene Verpflichtung. Selbst in kleinen Dingen lenken solche quasi öffentlichen Äußerungen unser zukünftiges Handeln.

Noch ein Beispiel: Joseph Schwarzwald und seinen Mitarbeitern von der Bar-Ilan-Universität in Ramar-Gan (Israel) gelang es, das Spendenaufkommen für Behinderte in bestimmten Bezirken beinahe zu verdoppeln. Wie hatten sie das erreicht? In den betreffenden Bezirken hatte das Team zwei Wochen vor der Spendensammlung Unterschriften für die Förderung Behinderter eingeholt – somit hatten die Bewohner derselben Sache zuvor gewissermaßen öffentlich beigepflichtet.



Soziale Gültigkeit

Ende der sechziger Jahre, ein kalter Wintermorgen in New York. Mitten auf einem belebten Bürgersteig bleibt plötzlich ein Mann stehen und starrt eine volle Minute lang gen Himmel, einfach so. Drei Sozialpsychologen von der City University of New York haben ihn damit beauftragt: Stanley Milgram, Leonard Bickman und Lawrence Berkowitz. Sie wollen die Reaktion der Passanten beobachten. Die meisten Leute machen um den Mann einfach einen Bogen oder drücken sich an ihm vorbei. Aber ungefähr jeder Zwanzigste der Vorübereilenden bleibt stehen und guckt auch nach oben.

Die Forscher wiederholen den Versuch. Nur dass diesmal gleich fünf Mitarbeiter anhalten und in den Himmel blicken. Diesmal stellt sich annähernd jeder fünfte Passant dazu und schaut gleichfalls in die Luft. Und ganze Menschentrauben von Luftguckern bilden sich innerhalb der einen Versuchsminute, als fünfzehn Personen abgestellt sind, plötzlich intensiv zum Himmel hoch zu starren, als gäbe es dort höchst Interessantes zu sehen. Nun schließen sich den Lockvögeln vier von zehn Fußgängern an, so dass an der Menschtraube kaum noch jemand vorbeikommt.

Wieso wirkten die Folgeversuche so viel mehr? Menschen orientieren sich gern an anderen. Besonders wenn viele Leute das Gleiche tun oder in einer ähnlichen Situation getan haben, meinen wir leicht, ihr Verhalten sei in dem Fall wohl das richtige, das gültige. In viele unserer Entscheidungen fließt ein, wie die meisten anderen sich unter gleichen Umständen benehmen.

Das nutzen viele gezielt, wenn sie uns für etwas gewinnen wollen. Sie weisen auf – oder deuten an –, dass andere Leute unseres Schlages schon längst mitmachen. Zum Beispiel ergab eine Studie, dass Hauseigentümer einem Spendensammler eher Geld für eine örtliche Hilfsorganisation gaben, wenn der Sammler ihnen eine Liste mit den Namen von Nachbarn zeigte, die auch schon Geld gespendet hatten. Je länger die Namensliste war, umso bereitwilliger öffneten die Leute ihr Portemonnaie. Wegen dieser menschlichen Eigenschaft tun Firmen uns gern sogleich kund, wenn ein Produkt ihres Hauses das meistgefragte in der Branche ist oder die höchste Verkaufssteigerung aufweist. Auch in Werbespots stürmen nicht von ungefähr dauernd Menschenmassen Läden, die bestimmte Artikel anpreisen.

Eben diese psychische Eigenschaft unterminiert aber leider auch so manche wohlgemeinte Kampagne etwa zum Gesundheitsbewusstsein oder zum Umweltschutz. Den Initiatoren ist diese typische menschliche Reaktionsweise oft wenig klar. Gerade die Orientierung an anderen, an der Masse, kann bewirken, dass solche Appelle leicht das Gegenteil des Angestrebten bewirken. Es dürfte oft ungeschickt sein, wenn auch verständlich, dass solche Aktionen gern mit erschreckenden Statistiken aufwarten: über Alkoholmissbrauch, Drogenkonsum, Umweltverschmutzung. So richtig die angeführten Argumente gegen dergleichen Missstände sind, bedenken die Mahner doch nicht genügend, nach welchen Regeln Menschen sich auf etwas einlassen und ihr Verhalten ändern. Hinter einem Aufruf: „Seht, wie viele das *Schlechte* tun!“ lauert die mächtige, verheerende Botschaft: „Seht, wie viele das Schlechte *tun*.“ Wissenschaftliche Untersuchungen belegen denn auch, dass viele solcher Programme das unerwünschte Verhalten eher noch fördern.

Wer sich in Unterschriftenlisten einträgt, macht seine Meinung öffentlich kund. Dieser Stellungnahme wird er sich in nächster Zeit bei anderen Anlässen verpflichtet fühlen.



LUIS M. ALVAREZ, AP PHOTO

Den Fehler begingen auch die Mitarbeiter einer Kampagne im US-Bundesstaat New Jersey gegen die hohe Selbstmordquote bei Jugendlichen. Sie klärten Teenager darüber auf, wie viele ihrer Altersgenossen sich das Leben nehmen. Doch als der Gesundheitsforscher David Shaffer und seine Kollegen von der Columbia University in New York die jungen Leute später befragten, kam heraus, dass ein Selbstmord ihnen nun sogar eher als letzte Lösung erschien als vorher. Appelle haben mehr Erfolg, wenn sie klar herausstellen, welchen Schaden das angeprangerte Verhalten anrichtet, und dass der Schaden groß ist, obwohl sich relativ wenige Menschen verkehrt verhalten.

Zuneigung

Menschen, denen wir verbunden sind, tun wir gern einmal einen kleinen Gefallen. Das gilt umso mehr gegenüber Freunden und Bekannten, die uns sympathisch sind. Diesen menschlichen Zug flocht die amerikanische Firma Tupperware geschickt in ihr Verkaufskonzept ein und macht damit seit Jahrzehnten weltweit Gewinne: Eine Hausfrau lädt einen Kreis Freundinnen zum gemütlichen Beisammensein ein und organisiert mit einer freundlichen Vertreterin der Firma eine nette, kleine Verkaufsshow für verschließbare Plastikbehälter. Nur der Freundin oder Nachbarin zuliebe fühlt manche Teilnehmerin sich bemüßigt, etwas von dem Angebot zu erstehen. Unter günstigen Bedingungen erhält die Gastgeberin nämlich etwas umsonst oder zu besseren Konditionen. Dazu kann auch gehören, dass eine der Teilnehmerinnen demnächst auch zu der häuslichen Verkaufsveranstaltung einlädt. Mittlerweile startet nach Angaben der Firma auf der Erde alle 2,7 Sekunden eine so genannte Tupperparty. Drei Viertel der Ware wird heute sogar außerhalb der USA umgesetzt, in Ländern, in denen die Menschen auf enge soziale Bindungen noch mehr Wert legen. Das Hausparty-Konzept fand Nachahmer, die alle möglichen anderen Produkte präsentieren. Die persönliche Atmosphäre und das Gefühl, eigentlich der Freundin etwas abzukaufen, dürften zu dem großen Erfolg viel beitragen.

Die meisten Verkäufe spielen sich natürlich nicht in den Wohnungen von lieben Bekannten ab. Doch auch in einer weniger vertrauten Umgebung verstehen Händler, Politiker oder Spendensammler die Macht der Verbundenheit und Sympathie heraufzubeschwören. Wie wissenschaftliche Studien zeigen, taktieren sie geschickt mit bestimmten Mitteln. Äußerliche Attraktivität kann ein solcher Faktor sein. Dies prüften Peter H. Reingen von der Arizona State University in Tempe und Jerome B. Kernan von der University of Cincinnati (US-Bundesstaat Ohio) 1993.

Ihrer Studie zufolge brachten bei einer Sammlung für die amerikanische Herzliga gut aussehende Mitarbeiter fast doppelt so viele Spenden ein wie andere. Auch Politiker können von ihrer Erscheinung profitieren. Schon in den siebziger Jahren zeigten Michael G. Efran und E.W.J. Patterson von der Universität von Toronto, dass bei den kanadischen Parlamentswahlen gut aussehende Kandidaten deutlich mehr Stimmen erhalten hatten als ihre weniger attraktiven Kontrahenten. Auf Nachfrage versicherten die Leute trotzdem, dass sie ihre Stimme niemals nach dem Aussehen abgeben würden.

Auch vermeintliche Gemeinsamkeiten können schnell eine gewisse Vertrautheit schaffen. Deswegen suchen Verkäufer nach Bezugspunkten zwischen sich und dem Kunden, manchmal recht krampfhaft: „Nein, ehrlich, Sie sind aus Minneapolis? Ich bin in Minnesota zur Schule gegangen!“ Bei Spendensammlungen hat sich dieser Trick gleichfalls bestens bewährt. In einer Studie der Psychologen R. Kelly Aune und Michael D. Basil von der Universität von Hawaii in Manoa beziehungsweise der Universität Denver (US-Bundesstaat Colorado) von 1994 sprachen Mitarbeiter auf einem College-Campus Studenten um Spenden für eine Hilfsorganisation an. Sie erhielten doppelt so viel Geld, wenn sie dabei kund taten: „Ich bin auch Student.“

Komplimente sind eine andere beliebte Strategie, die Verkäufer lernen. Sogar unzutreffendes Lob verfehlt seine Wirkung selten. Forscher der Universität von North Carolina in Chapel Hill konnten zeigen, dass dies dem Schmeichler genauso viel Sympathie einbringt wie ein ehrliches Kompliment.



TUPPERWARE (1958), AP PHOTO

Wer wird der Freundin oder Nachbarin nicht den Gefallen tun, auf ihrer Verkaufsparty etwas zu erstehen? Die amerikanische Firma Tupperware ist längst nicht mehr die Einzige, die soziale Verbundenheit in dieser Weise ausnutzt.

Menschen lassen sich auch durch scheinbare Kooperation gewinnen. Verkäufer beispielsweise setzen oft einiges daran, als jemand wahrgenommen zu werden, der für den Vorteil des Kunden ficht. Nicht selten spielt der Verkaufsmanager eines Autohauses den Bösewicht, damit der Verkäufer sich scheinbar für den Kunden einsetzen kann. Dieser Winkelzug fördert natürlich eine gefühlsmä- ▶

ßige Verbundenheit des Kunden mit dem Verkäufer – was den Geschäften nur dienlich sein kann.

Autoritätsgläubigkeit

Wer ist nicht schon hinterhergehastet, als jemand vor ihm bei Rot über eine Straße ging? Hierbei wirkt ganz klar der schon besprochene soziale Mechanismus, auch zu machen, was andere tun. Aber 1955 steckten Wissenschaftler der Universität von Texas in Austin einen Mitarbeiter in einen eleganten Anzug nebst Krawatte. Prompt liefen dreieinhalbmal mehr Passanten hinter ihm her über die rote Ampel als vorher, als er lässig gekleidet gewesen war. Denn jetzt trug er die Insignien der Autorität.

Auch wer seine langjährige Erfahrung betont, auf besondere Kenntnisse oder wissenschaftliche Zertifikate verweist, setzt vermutlich auf Autorität: „Mit Kindern kennen wir uns aus!“ „Achtzig Prozent aller Ärzte empfehlen dies!“ (Die Biografie des Autors am Ende dieses Artikels dient teilweise dem gleichen Zweck.) Solange die Angaben wahr sind, ist daran nichts auszusetzen. Menschen wünschen die Meinung von wirklichen Autoritäten zu erfahren. Deren Sachverstand verhilft uns zu schnellen und richtigen Entscheidungen.

Doch bedenklich wird die Sache, wenn wir einer falschen, nur gespielten Autorität aufsitzen. Allzu leicht blenden wir unseren Verstand angesichts von Autoritätssymbolen aus und merken nicht, dass ein Ersatzexperte sich nur mit einer solchen Aura umgibt. Der „farbenblinde“ Ampelrowdy in Schlips und Kragen besaß im Straßenüberqueren bestimmt keine größere Autorität als die übrigen Fußgänger. Auch ein Schauspieler, der in einer Fernsehserie den Arzt mimt, versteht von Medizin nicht mehr als viele Durchschnittsbürger. Trotzdem verhalf Robert Young, allen Amerikanern einst als Dr. Marcus Welby sehr vertraut, einer Werbekampagne in den siebziger Jahren zu einem durchschlagenden Erfolg, in der er die gesundheitlichen Vorzüge von koffeinfreiem Kaffee pries. Das war eben damals der berühmteste Arzt Amerikas. Deutschen Lesern dürfte da die „Schwarzwaldklinik“ einfallen, die viele Fernsehzuschauer tatsächlich besuchen wollten.

Jemand wie Sie, mit Ihrem Verstand, erkennt den Wert dieses Artikels natürlich sofort. Ich habe aber auch den Eindruck, dass Sie ein sehr freundlicher, hilfsbereiter Mensch sind. Sicher würden Sie auch gern andere an diesen Erkenntnissen teilhaben lassen. Deshalb möchte ich Sie um eine kleine Gefälligkeit bitten: Würden Sie dieses Heft wohl an zehn Freunde verschenken? Das ist zu viel verlangt? Nun, das verstehe ich gut. Aber sicher sind Sie so nett, diesen Artikel einem Bekannten zu zeigen! Halt, warten Sie noch! Ich schenke Ihnen dazu eine Liste mit wichtigen Büchern zu diesem hochinteressanten Thema. Die bekommen Sie völlig umsonst, einfach weil Sie so sympathisch sind.

Ihre Hilfsbereitschaft haben Sie signalisiert. Sie sind also einverstanden? ... Überlegen Sie sich das Ganze gern in aller Ruhe. Seien Sie aber versichert, dass Menschen aus Ihren Kreisen dieser Bitte häufig nachkommen. Übrigens finde ich Ihre Kleidung schick. Ganz ehrlich.

Wertschätzung von Knappheit

Die Studenten sollten angeben, wie gut ihnen das Mensaessen schmeckte. Von einer Woche auf die andere fielen die Noten plötzlich doppelt so gut aus. Da hatte das Studentenwerk angekündigt, dass wegen eines Feuerschadens die nächsten zwei Wochen kein Essen ausgegeben würde. Sonst war alles beim Alten geblieben.

Dieser verblüffende Befund des Psychologen Stephen West von der Florida State University stammt aus den siebziger Jahren. Er zeigt, wie krass eine vermeintliche oder tatsächliche Verknappung unsere Wertschätzung verändern kann. Dazu ließen sich viele andere Beispiele erzählen. Was rar erscheint, wollen wir gerade haben. Marketingstrategen wissen das nur zu gut. Ein Angebot verkauft sich umso besser, je begrenzter oder einmaliger es angeblich ist. Deswegen heißt es bei vielen Sonderaktionen: „Nur noch bis zum Ende der Woche“ oder „So lange der Vorrat reicht“. Der Kunde meint deswegen mit anderen um die Ware konkurrieren zu müssen und beeilt sich, sie zu erwerben.

Der Anreiz der Knappheit gilt jedoch auch für immaterielle Güter. Dazu gehören vor allem auch Informationen. „Exklusive“ Nachrichten haben besonders viel Kraft. Als Beispiel seien Ergebnisse aus der Doktorarbeit meines früheren Studenten Amram Knishinsky zitiert. Er besitzt eine Firma, die Rindfleisch in die USA importiert und an Supermärkte vertreibt. Für seine Doktorarbeit testete er die Wirkung von Knappheit und Exklusivität auf die Auftragslage. In einem ers-

„Persuasion“ – uralte Kunst in modernen Gewändern

Auf die im Artikel gemeinte Weise des Beeinflussens passen verschiedene Wörter unserer Alltagssprache: vom Überzeugen, Überreden, Appellieren bis hin zum Manipulieren, Suggerieren und Verführen, je nach Intention und Kontext. Kommunikationswissenschaftler bezeichnen den Sachverhalt mit dem Begriff „Persuasion“, ursprünglich abgeleitet vom lateinischen persuasio, „Überredung“.

Verkaufs-, Werbe- und Marketingprofis trainieren Persuasionstechniken. Auch Manager lernen diese Art von Menschenführung. Das Wort hat dabei durchaus einen positiven Beiklang. Die Experten haben längst erkannt, dass Kunden, Verhandlungspartner, Mitarbeiter am besten als autonome, selbst entscheidende Persönlichkeiten zu behandeln sind. Über die Kunst, durch geschicktes Reden Einfluss auszuüben, und ihren Wert stritten schon die Philosophen der griechischen Antike. Die Römer kultivierten die Redefertigkeit geradezu. Im Mittelalter zählte die Rhetorik zu den sieben freien Künsten. Gemessen daran erscheinen die heutigen Verfahren nicht kunstvoller.

Zwar ist die Persuasion als psychiatrische Heilmethode aus der Mode gekommen ist – sie sollte Einsicht durch Belehrung und Suggestion bringen. Doch gerade in heutiger Zeit wollen nicht nur Beschäftigte der Wirtschaft, Politik oder Publizistik Verhaltensweisen oder Einstellungen von Menschen gezielt verändern. Auch Lehrer, Sozialarbeiter und Ärzte bemühen sich darum.

Adelheid Stahnke

ten Test sollten Firmenmitarbeiter Abnehmer anrufen und ihnen ein Standardangebot unterbreiten. Einem Teil der Kunden sollten sie gleichzeitig mitteilen, dass eine Verknappung von australischem Rindfleisch zu erwarten sei – was wegen der australischen Wetterverhältnisse stimmte. Die über den Engpass informierten Kunden bestellten mehr als doppelt so viel wie sonst.

Aber in einem zweiten Test bekamen andere Abnehmer zusätzlich die Information, die Firma habe ihre Kenntnisse aus exklusiver Quelle beim australischen Wetterdienst. Daraufhin bestellten diese Kunden über sechsmal so viel Fleisch wie sonst. Bei ihnen hatte der Anreiz von Knappheit gleich doppelt gewirkt: Nicht nur, dass das Rindfleisch Mangelware wurde, sondern auch dieses Wissen selbst war eine Mangelware.

Wissen ist Macht

Es ist kein Zufall, dass bei so vielen der in diesem Artikel erwähnten Befunde Marketingexperten, Werbestrategen, Verkäufer oder Spendensammler mitwirkten. Sie alle sind Profis im Überzeugen und Beeinflussen. Würden sie ihr Metier nicht beherrschen, wären sie bald ausgemustert. Umgekehrt pflanzen bewährte und lukrative Strategien sich fort. Darum finden sich in den althergebrachten Überzeugungsberufen die wirksamsten Methoden sozialer Einflussnahme. Diese psychischen Mittel dürften auf den hier beschriebenen sechs Grundtendenzen menschlichen Verhaltens beruhen.

Von der Evolution her betrachtet sollten die dargestellten Verhaltensprinzipien deswegen entstanden sein, weil es darauf ankam, in sozialen Gruppen bestmöglich zurechtzukommen. In den allermeisten Fällen weisen uns diese Mechanismen den richtigen Weg. Denn normalerweise ist es überaus sinnvoll, Gefälligkeiten zu erwidern, sich als beständig zu erweisen, an seinesgleichen zu orientieren, von Verbundenheit und Sympathie tragen zu lassen, an Autoritäten zu halten und knappe Ressourcen wertzuschätzen.

Wer diese Prinzipien gebraucht, um auf uns Einfluss nehmen, tut uns damit meistens wirklich einen Gefallen. Wenn Werbemacher bei einem Kopfschmerzmittel herausstellen, dass dieses Medikament besonders gut wirkt und vertragen wird, und sich dazu auf seriöse Forschungen berufen – sich also auf wissenschaftliche Autorität stützen –, so profitieren alle Seiten davon: die Werbeagentur, der Hersteller *und* der Verbraucher. Der Fall liegt anders, wenn ein Produkt sich nach wissenschaftlichem Ermessen nicht auszeichnet, dafür die Werbung mit Schauspielern im Laborkittel aber Autorität „einschmuggelt“.

Hilflos ausgeliefert sind wir solchen Machenschaften jedoch nicht. Denn wie soziale Einflussnahme funktioniert, lässt sich verstehen. Das gibt uns die Chance, die eingesetzten Methoden zu durchschauen. Also können wir ein Angebot oder eine Aufforderung kritisch hinterfragen. Wir sind gefordert, Rechenschaft einzufordern, ob die Profis der Überzeugungskunst nun eine Ware, eine Dienstleistung oder eine politische Idee verkaufen oder eine Spendenkasse füllen wollen. Nur wenn diese Leute ehrlich vorgehen, sollten wir uns auf die Sache einlassen.

Wer darauf achtet, zwischen Schein und Sein zu unterscheiden, der lässt sich nicht mehr so leicht beschwatzen, vielmehr im besten Sinne des Wortes überzeugen – nämlich durch solide Information. Auch wir selbst dürfen ruhig die Kunstgriffe sozialer Einflussnahme gebrauchen, solange wir uns dabei an die Wahrheit halten. Es ist legitim, auf die eigene Fachkenntnis hinzuweisen, auf die Zustimmung anderer Menschen, auf Möglichkeiten der Kooperation. Damit dienen wir den Interessen beider Seiten und leisten unseren Beitrag zur Stärkung gesunder gesellschaftlicher Strukturen. ■

Soziale Einflussnahme im Spiegel der Kulturen

Die sechs Schlüsselfaktoren sozialer Einflussnahme wirken im Prinzip bei Menschen aller Kulturen. Dennoch gewichten Normen, Traditionen und Erfahrungen teilweise die einzelnen Methoden der Beeinflussung verschieden.

Kürzlich erschien dazu eine Studie von Michael W. Morris, Joel M. Podolny und Sheira Ariel von der Stanford University (US-Bundesstaat Kalifornien) über Mitarbeiter eines multinationalen Finanzunternehmens. Die Wissenschaftler beobachteten Angestellte in vier Ländern: USA, China, Spanien, Deutschland. Sie untersuchten, wie bereitwillig die Angestellten einem Kollegen beisprangen, wenn der sie bei einer Arbeit um Mithilfe bat. Oft spielten zwar mehrere der Schlüsselfaktoren mit, doch insgesamt fußte die Bereitschaft zur Kooperation je nach Land auf anderen Motivationen.

Die Amerikaner dachten hauptsächlich an Gegenseitigkeit. Sie fühlten sich verpflichtet, dem Kollegen unter die Arme zu greifen, wenn sie ihm noch einen Gefallen schuldig waren.

Die Chinesen richteten sich vorrangig nach Autorität. Sie sahen sich in der Pflicht, wenn der Betreffende jemandem in der eigenen Abteilung verbunden war, besonders wenn derjenige einen hohen Status besaß.



Bei den Spaniern zählten in erster Linie Freundschaft und Sympathie. Sie waren am ehesten hilfsbereit, wenn zwischen eigenen Freunden und dem Kollegen eine Verbindung bestand.

Die Deutschen suchten offizielle Regelungen einzuhalten. Sie sahen sich zur Hilfe angehalten, wenn sie meinten, dies würde im Betrieb so erwartet.

Literaturhinweise

Die Psychologie des Überzeugens. Ein Lehrbuch für alle, die ihren Mitmenschen und sich selbst auf die Schliche kommen wollen. Von Robert B. Cialdini. Verlag Hans Huber, 1997 (2. Nachdruck 1999).

Überzeugen im Handumdrehen. Wie und warum sich Menschen beeinflussen und überzeugen lassen. Von Robert B. Cialdini, mvg, 2. Auflage 1993.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Robert B. Cialdini *lehrt an der Arizona State University in Tempe. Sein Buch „Influence“ (deutsch: „Die Psychologie des Überzeugens“) erschien in neun Sprachen.*

Raketen unter Wasser

PHILIP HOWE

Neuartige Torpedos und andere Prototypen künftiger Unterwasserwaffen jagen mit mehreren hundert Kilometern pro Stunde durchs Meer. Ihr Geheimnis ist eine Hülle aus Gasblasen, die bei hohen Geschwindigkeiten entsteht und den Strömungswiderstand drastisch verringert.

Von Steven Ashley

Sofort nach der Havarie des russischen U-Boots K-141 „Kursk“ im August 2000 – es sank mit seiner hundertköpfigen Besatzung auf den Grund der arktischen Barentssee – kamen Gerüchte auf, die mysteriöse Explosion an Bord hänge mit der Erprobung eines geheimnisvollen Torpedo-Typs zusammen. Einige Monate zuvor war der amerikanische Geschäftsmann Edmond Pope in Moskau unter Spionageverdacht verhaftet worden; es hieß, er habe Baupläne für einen Supertorpedo kaufen wollen. Trotz vieler ungeklärter Details scheinen beide Vorfälle auf eine völlig neue und öffentlich kaum bemerkte Technologie hinzuweisen, mit deren Hilfe Projektile und Tauchboote unter Wasser mehrere hundert Kilometer pro Stunde – gelegentlich sogar Überschallgeschwindigkeit – erreichen können. Zum Vergleich: Die schnellsten herkömmlichen Unterwassersysteme bringen es auf maximal 130 Kilometer pro Stunde.

In den letzten Jahren mehren sich Anzeichen dafür, dass alle größeren Seemächte an der Entwicklung ganzer Arsenale neuartiger Unterwasserwaffen und U-Boote arbeiten, die mit nie da gewesener Geschwindigkeit zu operieren vermögen. Diese Fähigkeit beruht auf einem physikalischen Effekt namens Superkavitation: Hinter einem Körper, der in einen schnellen Wasserstrom eintaucht, entstehen Blasen aus Wasserdampf. Wenn es nun gelingt, den Körper so vollständig mit einer sich selbst erneuernden Gashülle zu umgeben, dass seine Oberfläche kaum mehr mit Flüssigkeit benetzt wird, nimmt der Reibungswiderstand drastisch ab. Solche Systeme könnten die Seekriegführung ähnlich radikal umwälzen wie einst der Übergang von Propellermaschinen zu Düsenjägern und Raketen den Luftkrieg. ▶

Obwohl in die Erforschung der Superkavitation derzeit eher bescheidene Finanzmittel fließen – in den USA rund 50 Millionen Dollar –, ist die Liste möglicher militärischer Anwendungen erstaunlich lang. Sie umfasst extrem schnelle Unterwasserprojektile, mit denen Drehgeschütze, die den MG-Türmen auf Bombern des Zweiten Weltkriegs ähneln, unter Wasser auf Minen, zielsuchende Torpedos, U-Boote und sogar auf tief fliegende Flugzeuge oder Helikopter schießen können. Weitere Optionen sind etwa Hochgeschwindigkeitstorpedos, die Schiffe und andere Torpedos abfangen, sowie ungelenkte Gefechtsbrecher mittlerer Reichweite (*midrange unguided engagement breakers*) – ein größerer Waffentyp, der einen Konflikt zwischen zwei U-Booten gewaltsam beenden soll. Schließlich sind kleine superschnelle Oberflächenboote denkbar sowie Unterwasserraketen mit Nuklearsprengköpfen, die ganze Flugzeugträger-Verbände auszuschalten vermögen.

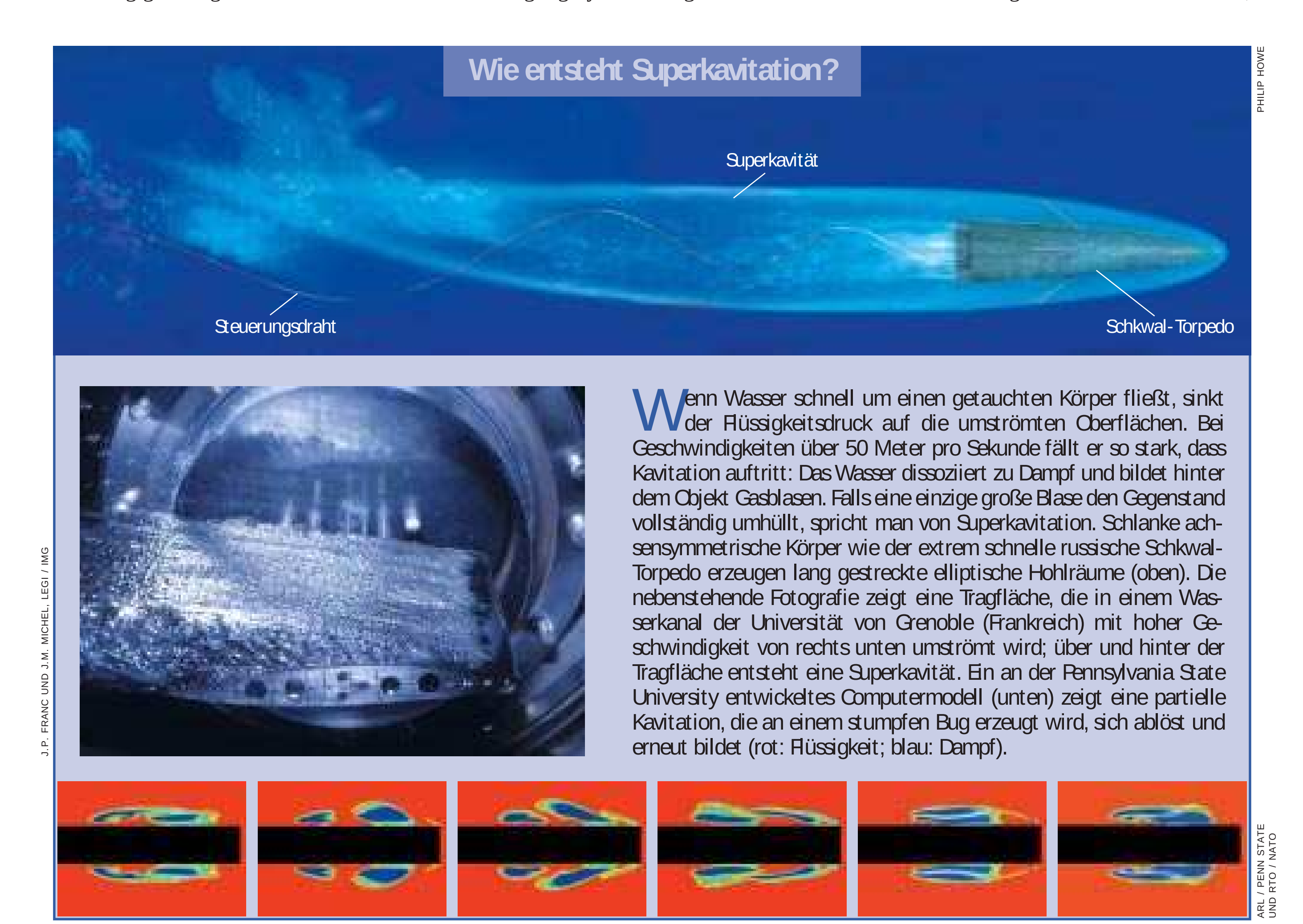
Einige Marineexperten glauben, dass Superkavitationssysteme den U-Boot-Krieg grundlegend verändern werden: An die Stelle des leisen Katz-und-Maus-Spiels zwischen großen U-Booten treten lärmende Zweikämpfe zwischen kleinen und schnellen „Unterseejägern“ kurzer Reichweite, die von riesigen Träger-U-Booten aus gestartet werden und einander mit Unterwassermunition beschießen.

Wirksam und billig die Raketenabwehr unterlaufen

Andere Fachleute stellen sich eine mehrstufige Kombination aus Superkavitationstorpedo und Raketen mit Nuklearsprengköpfen vor – im Jargon „präventive Langstreckenlenkwaffe“ (*longrange guided preemptive weapon*) genannt –, um damit auf relativ billige und wirksame Weise künftige Raketenabwehrsysteme vom „Star-Wars“-Typ zu unterlaufen. Solche Waffen könnten Hunderte von Kilometern vor der Küste abgefeuert werden, unter Wasser bis zu einem zielnahen Küstenstreifen jagen und erst dort aus dem Wasser aufsteigen; sie würden ihre tödliche Ladung ins Ziel bringen, bevor luft- oder weltraumgestützte Verteidigungssysteme reagieren könnten.

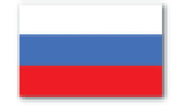
Überraschenderweise existiert, wie wir jetzt wissen, wenigstens eine Superkavitationswaffe schon seit vielen Jahren. Die sowjetische Marine nahm bereits 1977 nach zehnjähriger Entwicklung heimlich den raketengetriebenen Torpedo „Schkwal“ (Sturmbö) in Betrieb; er vermag mit mindestens 350 Kilometern pro Stunde in einem selbst erzeugten Gashohlraum durchs Wasser zu „fliegen“. Diese nuklear bestückte Unterwasserrakete ist zwar in mancher Hinsicht etwas primitiv und nicht besonders wirkungsvoll, doch als die westlichen Militärmächte Anfang der neunziger Jahre davon erfuhren, waren sie gezwungen, die Superkavitationstechnik ernst zu nehmen.

Bevor derartige Waffen der nächsten Generation tatsächlich eingeführt würden, müssten freilich nicht nur technische Probleme gelöst werden; auch ökologische Bedenken und die Sicherheit der Schifffahrt wären zu beachten. Am schwierigsten dürfte es werden, das erforderliche Geld für die Entwicklung und den Bau solcher Systeme aufzutreiben. Allerdings lehrt die Geschichte,



Wenn Wasser schnell um einen getauchten Körper fließt, sinkt der Flüssigkeitsdruck auf die umströmten Oberflächen. Bei Geschwindigkeiten über 50 Meter pro Sekunde fällt er so stark, dass Kavitation auftritt: Das Wasser dissoziiert zu Dampf und bildet hinter dem Objekt Gasblasen. Falls eine einzige große Blase den Gegenstand vollständig umhüllt, spricht man von Superkavitation. Schlanke achsensymmetrische Körper wie der extrem schnelle russische Schkwal-Torpedo erzeugen lang gestreckte elliptische Hohlräume (oben). Die nebenstehende Fotografie zeigt eine Tragfläche, die in einem Wasserkanal der Universität von Grenoble (Frankreich) mit hoher Geschwindigkeit von rechts unten umströmt wird; über und hinter der Tragfläche entsteht eine Superkavität. Ein an der Pennsylvania State University entwickeltes Computermodell (unten) zeigt eine partielle Kavitation, die an einem stumpfen Bug erzeugt wird, sich ablöst und erneut bildet (rot: Flüssigkeit; blau: Dampf).

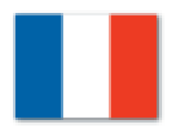
Superkavitations-Forschung in aller Welt



Russland: Obwohl weltweit führend in der Superkavitationswaffentechnik, ist unklar, welche Fortschritte das Land in den letzten Jahren gemacht hat. Ein wichtiges Geheimprojekt soll am berühmten Zentralinstitut für Aerohydrodynamik (ZAGI) in Shukowski vorangetrieben werden; dort ist vermutlich die Schkwal-Unterwasserrakete größtenteils entwickelt worden. Westliche Experten glauben, dass die russischen Forscher als Erste Überschallgeschwindigkeiten unter Wasser erreichten; möglicherweise wird am ZAGI auch an Superkavitations-U-Booten geforscht.



Ukraine: Wichtige Grundlagenforschung für den russischen Schkwal-Torpedo hat das Ukrainische Institut für Hydromechanik in Kiew geleistet; zu sowjetischen Zeiten wurde es von Akademiemitglied Georgi Logwinowitsch geleitet, einem Pionier der Superkavitationstheorie. Das Institut verfügt über einen raffinierten Versuchstank, in dem drahtgelenkte Modelle durch Wasser katapultiert oder von Düsentriebwerken beschleunigt werden. Seit dem Ende der Sowjetunion tauschen die Forscher aus Kiew, die für ihre erfolgreichen semianalytischen mathematischen Modelle und umfangreiche Versuchsreihen bekannt sind, einschlägige Informationen mit ihren amerikanischen Kollegen aus.



Frankreich: Seit etwa zehn Jahren leitet die Direction des Recherches, Études et Technique (DRET) ein Programm namens Action Concertée Cavitation. Verlässlichen Quellen zufolge erforscht die französische Regierung energisch und geheim die Superkavitationswaffentechnik. So soll Frankreich von Russland mehrere Schkwals erworben haben. Das Deutsch-Französische Forschungsinstitut in Saint-Louis (Frankreich) führt derzeit erste Tests für Superkavitationsprojektile durch, die aus der Luft gegen Minen abgefeuert werden können.



Deutschland: Das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung in Koblenz entwickelt gemeinsam mit Forschern der US-Marine neue Kavitator-Konstruktionen und Zielsuchsysteme für Torpedos. Auch wurde die erste Entwicklungsphase für den Prototyp eines Superkavitationstorpedos abgeschlossen, der demnächst in den USA erprobt werden soll.

dass für Militärtechnik selbst in Zeiten knapper Kassen stets Geld übrig ist.

„Da bis jetzt nur wenige dieser Geräte wirklich gebaut wurden, geht es uns in vieler Hinsicht ähnlich wie den Flugzeugkonstrukteuren nach dem ersten Flug der Gebrüder Wright“, meint Robert Kuklinsky, ein Ingenieur und Hydrodynamik-Forscher am Naval Undersea Warfare Center (NUWC) in Newport (Rhode Island), dem führenden Laboratorium der US-Marine für Superkavitationssysteme. „Aber im Gegensatz zu den Luftfahrtpionieren wissen wir viel mehr über die zu Grunde liegende Physik.“

Wie jeder Schwimmer weiß, kostet es beträchtliche Mühe, den Körper im Wasser voranzutreiben. Mit steigendem Tempo wird es immer Kraft raubender, denn die Oberflächenreibung nimmt mit wachsender Geschwindigkeit zu. Noch anstrengender sind Schwimmstöße für Taucher, da der Strömungswiderstand in Wasser tausendfach größer ist als in Luft.

Schiffsbauer und Marine-Ingenieure versuchen darum seit jeher, möglichst stromlinienförmige Hüllen und leistungsstarke Antriebe zu konstruieren. Doch nun haben Wissenschaftler und Ingenieure eine völlig neue Technik entwickelt, um den Strömungswiderstand zu überwinden und ungeahnte Geschwindigkeiten unter Wasser zu erreichen. Die Grundidee ist, die wasserbenetzte Oberfläche des Körpers auf ein Minimum zu reduzieren, indem er sich in einer Gasblase geringer Dichte fortbewegt.

„Wenn eine Flüssigkeit rasch um einen Körper fließt, verringert sich ihr Druck, vor allem an den hinteren Kanten“, erklärt Marshall P. Tulin, Direktor des Ocean Engineering Laboratory der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und führender Theoretiker der Superkavitation. „Mit zunehmender Geschwindigkeit wird schließlich ein Punkt erreicht, an dem der Druck in der Strömung dem Dampfdruck von Wasser entspricht. Die Flüssigkeit geht in die Gasphase über – sie wird zu Wasserdampf.“ Mit anderen Worten: Sobald der Druck nicht mehr ausreicht, die Wassermoleküle als Flüssigkeit zusammenzuhalten, dissoziieren sie zu Gas.

Blasenbildung erwünscht

„Unter gewissen Bedingungen, vor allem hinter scharfen Kanten, entstehen Hohlräume aus Wasserdampf und Luft mit ungefähr konstantem Druck. Das nennen wir natürliche Kavitation“, sagt Tulin. „Der Hohlraum ist so geformt, dass an seinen Grenzen konstanter Druck herrscht; seine Form wird von der Gestalt des umströmten Körpers, dem Druck im Hohlraum und der Schwerkraft bestimmt.“ Normalerweise ist die Kavitation unerwünscht, weil sie die Strömung verzerrt und dadurch Pumpen, Turbinen, Tragflächen und Schiffsschrauben ihrer Wirksamkeit beraubt. Außerdem entstehen beim rapiden Kollaps der Blasen heftige Stoßwellen, die Metallflächen eindellen und erodieren.

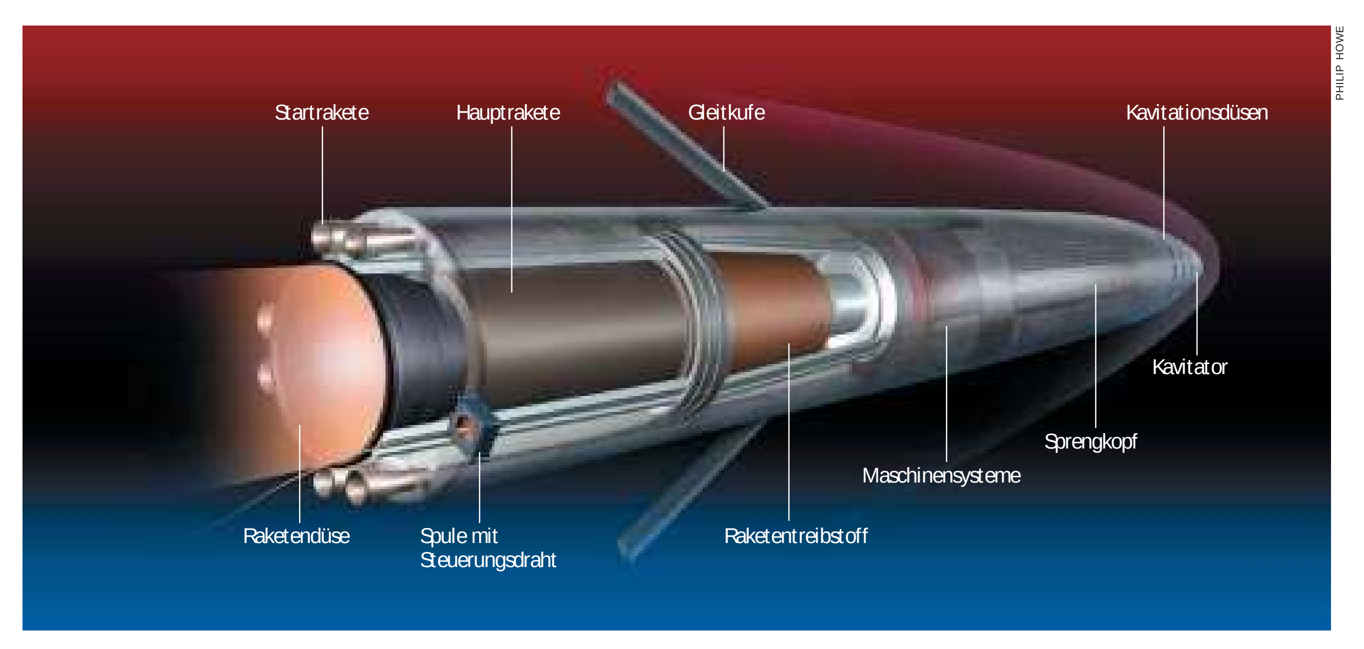
Die Superkavitation ist eine extreme Form der Kavitation, bei der sich eine einzige Blase bildet und das bewegte Objekt fast komplett umhüllt. Bei Geschwindigkeiten oberhalb von 50 Metern pro Sekunde erzeugen stumpfnasige Kavitatoren und am Bug montierte Gasdüsen solche Gastaschen geringen Drucks – so genannte Superkavitäten. Schlanke achsensymmetrische Körper bilden lang gestreckte ellipsenförmige Blasen, die am Bug beginnen und hinten in einer Art Schleppe auslaufen.

Die Länge dieser elliptischen Hohlräume hängt von der Geschwindigkeit ab; sie schließen sich bald wieder unter dem Druck des umgebenden Wassers und hinterlassen eine Region komplexer, instabiler Strömungen. Mathematische Modelle der Superkavitation scheitern oft an dem, was Tulin „das Durcheinander am Ende“ nennt, das heißt an der so genannten Kollaps- oder Verschlussregion der Kavität. In Wirklichkeit sind die ▶



PHILIP HOWE

Unterwasserkanonen
Die US-Marine entwickelt Geschütze, die auf drehbaren Türmen unter der Wasserlinie installiert werden und Hochgeschwindigkeitsprojektile gegen Minen, Barrieren, Schiffe und angreifende Torpedos abfeuern sollen – sogar gegen tief fliegende Flugzeuge und Helikopter.



Der Schkwal-Torpedo

Der russische Torpedo trägt am Bug vermutlich einen Kavitator in Form einer flachen Scheibe; zunächst entsteht dadurch eine partielle Kavität, die dann durch vorne montierte Lüftungsventile zu einer Superkavität aufgeblasen wird. Die kleinen Startraketen am Heck beschleunigen den Torpedo, bis sich eine Kavität gebildet hat; erst dann zündet das Haupttriebwerk.

Druckverhältnisse in den Gasblasen auch nicht konstant – laut Tulin eine Ursache vieler Modellierungsprobleme.

In den fünfziger Jahren konzentrierte sich die amerikanische Superkavitationsforschung auf Hochgeschwindigkeitsschiffsschrauben und Tragflügelboote, doch dann verlegte sich die US-Marine auf andere Unterwassertechnologien mit dem Ziel optimaler Tarnung statt höchster Geschwindigkeiten. Aus diesem Grund besitzt die Marine gegenwärtig keine Superkavitationswaffen und versucht nun, den Vorsprung der russischen Marine aufzuholen. Die einschlägige Forschung wird vom Office for Naval Research (ONR) in Arlington (Virginia) geleitet und richtet sich auf zwei Arten von Superkavitationswaffen: Geschosse und Torpedos.

Zur ersten Gruppe gehört RAMICS (*Rapid Airborne Mine Clearance System*), eine schnell einsetzbare helikoptergestützte Waffe, die knapp unter Wasser treibende Seeminen mit Superkavitationsprojektilen beschießt. Die flachnasigen 20-Millimeter-Geschosse werden von einem Schnellfeuergeschütz mit modernstem Zielgerät abgeschossen und müssen so geformt sein, dass sie sowohl in Luft als auch in Wasser stabile Flugbahnen beschreiben (siehe Kasten Seite 69). Die US-Marine plant außerdem ein auf Kriegsschiffen stationiertes Waffensystem kurzer Reichweite vom RAMICS-Typ, das dem Kielwasser folgende Torpedos zu zerstören vermag.

Steven Ashley *ist Redakteur bei Scientific American. Wichtige Informationen zum Thema verdankt er einem Nato-Spezialkurs über Superkavitationsströmung, an dem er im Februar 2001 am Von-Karman-Institut für Strömungsmechanik in Rhode-Saint-Genèse (Belgien) teilgenommen hat.*

„... ein großes Geschoss mit einer Rakete am Ende"

Der nächste Schritt ist ein reines Unterwasser-Geschützsystem mit so genannter *Adaptable High-Speed Undersea Munition* (AHSUM). Diese Superkavitationsprojektile sollen das Ziel durch ihre bloße Wucht vernichten und von stromlinienförmigen Geschütztürmen auf dem Rumpf getauchter U-Boote, auf der Unterseite von Schiffsrümpfen oder auf nachgeschleppten Minenräumschlitten abgefeuert werden. Das sonargesteuerte AHSUM-System soll das unterseeische Gegenstück zum Phalanx-Waffensystem werden – einer radargesteuerten Schnellfeuerkanone, die Schiffe vor angreifenden Cruise Missiles schützt.

Zur zweiten Waffengruppe gehört ein Torpedo mit 370 Kilometer pro Stunde Höchstgeschwindigkeit. Die systemtechnischen Herausforderungen sind enorm; der ONR-Programm-Manager Kam Ng nennt unter anderem Startvorgang, Hydrodynamik, Akustik, Lenkung und Steuerung sowie Antrieb. NUWC Newport leistet den Großteil der Forschung und wird unterstützt vom Applied Research Laboratory der Pennsylvania State University (kurz ARL/Penn State), der Universität von Florida sowie den Firmen Anteon und Lockheed Martin.

ARL/Penn State simuliert per Computer die Strömungsdynamik des Torpedos. „Wir versuchen die Verhältnisse nachzustellen, unter denen der Torpedo funktionieren soll, nämlich eine zweiphasige Strömung aus Wasser und Gas", erklärt Ng. „Wir wollen wissen, wie sich das Wasser verhält, wie die Gaskavität aussieht und wie wir erreichen, dass der Hohlraum den Körper jederzeit umhüllt. Nicht nur die Simulation ist kompliziert, sondern auch die Grundlagenphysik: Wir haben es hier nicht mit Strömung einer einzigen Phase zu tun, sondern mit etwas viel Komplexerem."

Anhand der russischen Schkwal-Unterwasserrakete lässt sich der Aufbau eines Superkavitationssystems der ersten Generation konkret erläutern. Mit vermutlich 8 Metern Länge und 2700 Kilogramm Gewicht ist der Torpedo „eigentlich ein großes Geschoss mit einer Rakete am Ende", scherzt Jurij N. Sawtschenko; er leitet die Forschungsgruppe des Ukrainischen Instituts für Hydromechanik in Kiew, wo die meisten Grundlagen der Superkavitationswaffentechnik erstmals entwickelt wurden.

Grundsätzlich besteht der Torpedo aus einem zylindrischen Rumpf, der ein Feststoff-Raketentriebwerk enthält und sich nach vorne kegelförmig verjüngt;

Kavitatoren

Eine Superkavität lässt sich durch unterschiedlich geformte Nasen erzeugen: flache Scheiben, Kegel, gezackte Platten und Kegel (links und Mitte) oder bewegliche, wie Kugelschreiberspitzen ausfahrbare Kegel (rechts).


PHILIP HOWE

dort sitzt der Sprengkopf. Die große Raketendüse hinten wird von acht kleinen Zylindern umringt – angeblich Startraketen, die den Torpedo schon auf Superkavitationsgeschwindigkeit beschleunigen, bevor das Haupttriebwerk zündet. Zwischen zwei Starterdüsen liegt vermutlich eine Spule mit Steuerungsdraht, der sich entrollt, während der Torpedo durchs Wasser schießt. Mit diesem Draht kann die U-Boot-Besatzung die Waffe lenken und den Sprengkopf zünden.

Über den Bug ist wenig bekannt. Fachleute glauben, dass die Torpedospitze eine flache Scheibe von kreisförmiger oder elliptischer Form trägt. Dies ist die wichtigste Komponente: der Kavitator, der den gasgefüllten Hohlraum um den Rumpf erzeugt. Die Kavitatorscheibe ist auf der Oberseite leicht vorwärts geneigt, um durch einen günstigen Angriffswinkel dem Vorderteil des Geräts Auftrieb zu verleihen. Vermutlich sind die Kanten der Scheibe sehr scharf, damit eine möglichst saubere, kaum turbulente Grenze zwischen Gas und Wasser entsteht – Hydrodynamiker sprechen dann von einer „glasigen“ Kavität. Direkt hinter dem Kavitator sitzen mehrere Ventilationsringe, die Raketenabgase und Dampf in die Kavitationsblase ausstoßen, um sie zu vergrößern. Vor dem hinteren Drittel des Torpedos ragen vier abspreizbare Zylinder schräg rückwärts. Sie sehen zwar ein wenig wie Flossen aus, dienen aber als gefederte Gleitkufen, die das Hinterende des Torpedos stabilisieren, indem sie es von der Grenzfläche der Gasblase zur Mitte hin drücken. Westliche Experten glauben, dass der Schkwal eine langsame Präzessionsbewegung im Innern des Hohlraums ausführt und unterwegs immer wieder von den „Wänden“ abprallt.

Wendige Unterwasser-Manöver

Der Schkwal gilt als eher schlichte Konstruktion, weil er sich nur geradeaus zu bewegen vermag. Künftige Superkavitationstorpedos sollen unter Wasser manövrieren können, indem sie mit Steuerungsflossen die Kavität durchstoßen oder Schwenkdüsen einsetzen. Bei allen Manövern gilt es unbedingt, den Rumpf in der künstlichen Blase zu halten. Andernfalls würde ihn die Wucht des Aufpralls auf die umgebende Wasserwand sofort in „eine platt gedrückte Cola-Dose“ verwandeln, meint Ivan Kirschner, Ingenieur am Engineering Technology Center der Firma Anteon in Mystic (Connecticut).

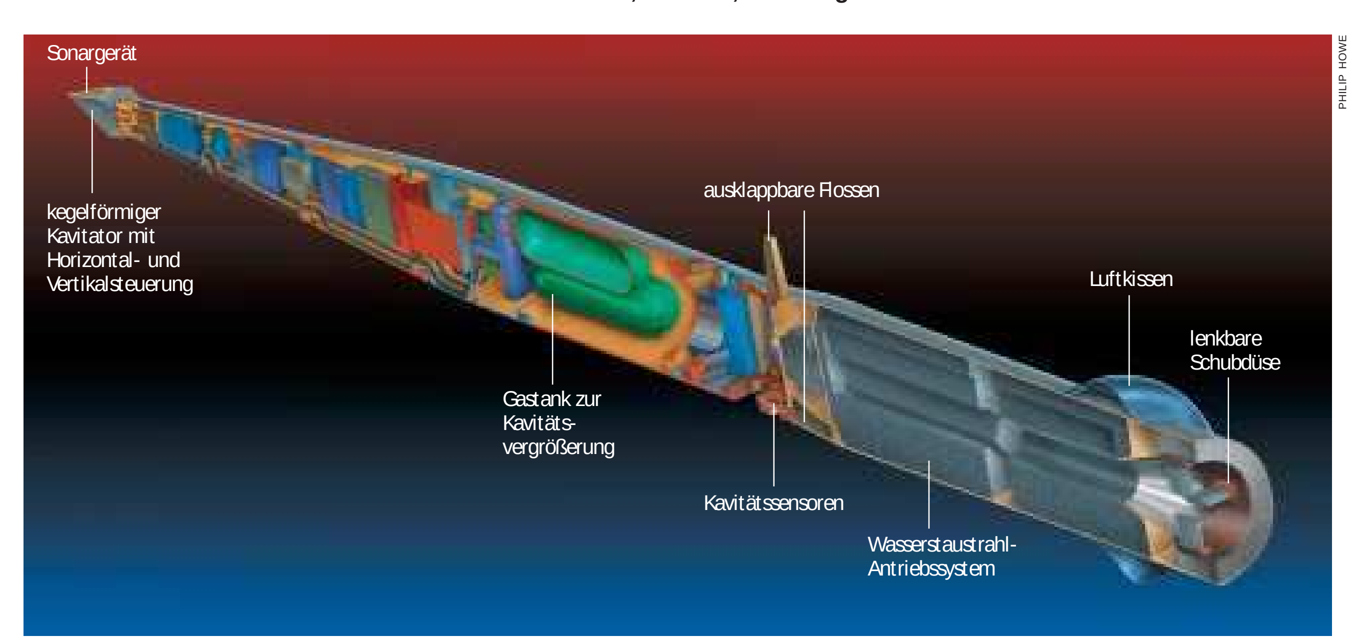
„Selbst dreidimensionale Dreh- und Kippmanöver wären möglich, wenn der Kavitator in zwei Ebenen gleichzeitig verschoben oder gedreht würde“, sagt Kirschner, „doch wären solche Geräte komplizierter“. Auch der Einsatz von kleinen beweglichen Hilfstragflächen in Bugnähe wird erwogen.

Superkavitationsgeräte könnten sehr wendig sein, falls ihre Steuerflächen präzise zusammenarbeiten würden, meint Kuklinsky vom NUWC. Prinzipiell geht es darum, die Kavität durch Bewegungen gelenkig montierter Kavitatornasen oder Steuerflächen so zu verformen, dass die gewünschten Seitenkräfte auftreten und der Torpedo damit gesteuert werden kann. Wenn die Kontrollsysteme an Bug und Heck so synchronisiert arbeiten, dass „das Hinterende mit dem mitkommt, was der Bug tut, sind sehr enge Kurven möglich“, stellt Kuklinsky fest.

Zu diesem Zweck ist eine verlässliche Feedback-Kontrolle in Echtzeit erforderlich, die den Zustand der Kavität am Heck des Torpedos laufend registriert und angemessen auf Veränderungen reagiert. Wenn Superkavitationssysteme ohne solche Hilfen in ihren Gasblasen dahinrasen, prallen sie mit dem Heck häufig gegen die Innenwand des Hohlraums. Dieses „Schwanzschlag-Phänomen“ lässt sich auf Hochgeschwindig- ▶

Amerikanischer Prototyp

Für künftige Superkavitationstorpedos der US-Marine werden neuartige Kavitatoren, Sensoren, Steuerungs- und Antriebstechniken entwickelt.



PHILIP HOWE

keitsaufnahmen von Versuchsgeräten immer wieder beobachten. Das ONR unterstützt deshalb die Entwicklung eines Schwanzschlag-Sensors aus mikroelektromechanischen Bauteilen, der gelegentliche Wandkontakte des Heckteils aufzeichnen soll.

Für künftige Geräte besonders wichtig ist der glatte Übergang zwischen normaler Tauchfahrt und Superkavitation. Dabei wird ein zunächst unvollständiger Hohlraum durch künstliches Belüften aufrechterhalten und vergrößert. Auf diese Weise lässt sich eine kleine natürliche Kavität, die bei niedriger Geschwindigkeit an der Nase entstanden ist, zu einer großen Hülle aufblasen, die den gesamten Körper umgibt. Umgekehrt werden Bremsvorgänge sanfter, wenn die Blase durch Gaszufuhr verstärkt wird, damit sie nicht abrupt zusammenbricht, sondern allmählich schrumpft.

Superkavitationstorpedos erzeugen die erforderliche Schubkraft mit Raketenmotoren, doch herkömmliche Triebwerke haben zwei große Nachteile: Ihr Aktionsradius ist begrenzt, und die Schubleistung nimmt mit der Tauchtiefe – wegen des wachsenden Außendrucks – immer mehr ab. Zur Lösung des ersten Problems werden neuartige Antriebe mit hoher Energiedichte entwickelt; das zweite lässt sich vielleicht mit einer speziellen Propellerschraube umgehen.

„Um auf Superkavitationsgeschwindigkeit zu kommen, braucht man eine Menge Leistung", erläutert Forscher Sawtschenko. „Damit Raketen den größtmöglichen Aktionsradius erreichen, muss man Treibstoffe hoher Energiedichte verbrennen, die maximalen Schub erzeugen." Er schätzt, dass ein typisches Feststoff-Raketentriebwerk bestenfalls einige Dutzend Kilometer Reichweite und Geschwindigkeiten von 200 Metern pro Sekunde schafft. Nachdem Sawtschenko Antriebssysteme mit Dieselaggregaten, Elektromotoren, Atomreaktoren und Gasturbinen untersucht hatte, kam er zu dem Schluss, dass „nur Gasturbinen und Strahltriebwerke mit Metallbrennstoffen – Aluminium, Magnesium oder Lithium – in Frage kommen, die Wasser aus der Umgebung als Oxidations- und Kühlmittel verwenden."



PHILIP HOWE

Anti-Minen-Geschosse

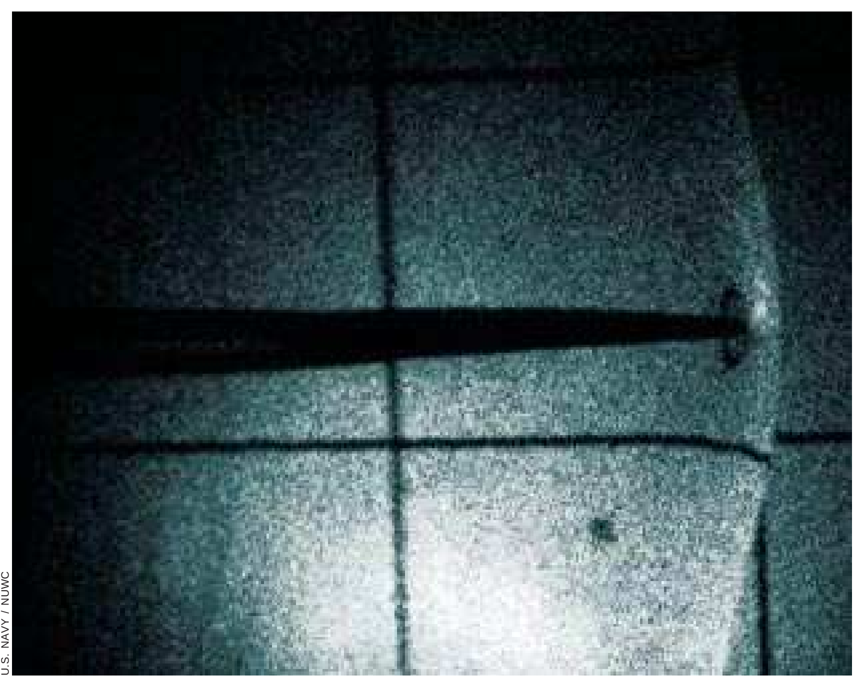
Aus der Luft abgefeuerte Superkavitationsprojektile müssen in Luft und Wasser einer stabilen Schussbahn folgen – eine schwierige Konstruktionsaufgabe.

Aluminium ist der energiereichste dieser Metalltreibstoffe und obendrein relativ billig. Es erzeugt Reaktionstemperaturen bis zu 10 600 Grad Celsius. „Man kann die Reaktion beschleunigen, indem man das Metall verflüssigt (das heißt schmilzt) und Wasserdampf verwendet", meint Sawtschenko. Ein Konstruktionsplan für ein Triebwerk sieht vor, Aluminiumplatten mit der Wärme der Verbrennungskammer bei 675 Grad Celsius zu schmelzen und gleichzeitig Meerwasser zu verdampfen. Über Turbinen sollen die Verbrennungsprodukte schließlich Propeller antreiben.

Ein solcher Motor ist in Russland nach dortigen Medienberichten schon entwickelt worden. Auch in den Vereinigten Staaten hat man Erfahrungen mit diesem Antriebstyp. Forscher am ARL/Penn State erproben ein Wasser-Staustrahltriebwerk, das Aluminium verbrennt; es war ursprünglich als zusätzlicher Antrieb für ein Schiff der Marine gedacht.

Überschall unter Wasser

Ein Forscherteam der US-Marine am Naval Undersea Warfare Center in Newport (Rhode Island) demonstrierte bereits 1997 den Abschuss eines Superkavitationsprojektils (von links) unter Wasser mit einer Mündungsgeschwindigkeit von 1549 Metern pro Sekunde – schneller als der Schall in Wasser.



U.S. NAVY / NUWC

Wie man in einer Blase in den Krieg zieht

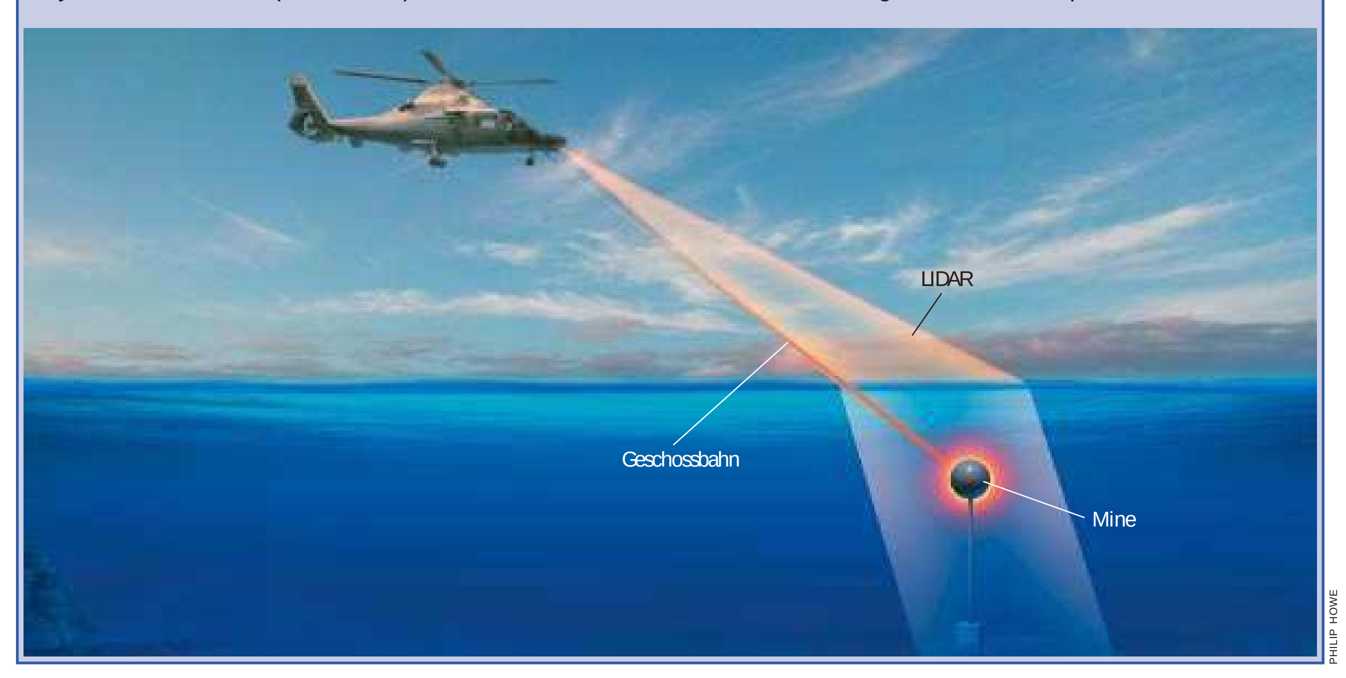
Bei der amerikanischen Version wird Aluminiumpulver in Meerwasser eingespeist, das in einer Wirbel-Brennkammer rotiert. Durch die rasante Kreisbewegung reiben sich die Aluminiumpartikel aneinander und schmirgeln die reaktionsträge Oxidschicht an ihrer Oberfläche ab. Dadurch kommt eine intensive exotherme Reaktion in Gang, bei der elementares Aluminium oxidiert wird. Der entstehende Hochdruckdampf schießt dann entweder aus einer Raketendüse oder treibt über eine Turbine eine Propellerschraube an.

Im Versuchsbetrieb können Propeller 20 Prozent mehr Schub liefern als bloße Raketentriebwerke – theoretisch sogar den Schub verdoppeln, meint Sawtschenko. Erprobt wurden Turbinensysteme mit einem einzigen Rumpfpropeller sowie ein Paar gegensinnig rotierender Propeller, die um die Außenhülle des Torpedos kreisen und dadurch die Grenze zwischen Gas und Wasser erreichen. Sawtschenko betont jedoch, dass „noch viel Forschungsarbeit über die richtige Wechselwirkung zwischen Propeller und Kavität zu tun bleibt".

Schon jetzt haben die Superkavitationswaffen eine gewisse Neubewertung der Seekriegsstrategie angeregt. Als die Existenz des Schkwal-Torpedos bekannt wurde, begann man über seinen Zweck zu spekulieren. Einige westliche Geheimdienste meinen, der Schkwal sei entwickelt worden, damit die lauten und technisch primitiveren Diesel-U-Boote der damaligen Sowjetunion auf einen Überraschungsangriff durch extrem leise amerikanische U-Boote reagieren könnten. Wenn die Schraubengeräusche eines angreifenden Torpedos herkömmlicher Bauart zu hören wären, würde der Schkwal gestartet, um den Angreifer zum Ausweichen zu zwingen und dadurch vielleicht den Steuerungsdraht des näher kommenden Torpedos zu kappen.

Anti-Minen-Projektile

Normale Geschosse prallen von der Wasseroberfläche ab oder verlieren unter Wasser sehr rasch ihre Energie. Das Office of Naval Research der US-Marine erprobt daher Superkavitationsgeschosse; damit ließen sich Minen auf Kosten sparende Weise unschädlich machen. So entstand RAMICS (*Rapid Airborne Mine Clearance System,* schnelles luftgestütztes Minenräumsystem), das für die US-Marine von einem Team unter der Leitung der Firma Raytheon Naval & Maritime Integrated Systems in Portsmouth (Rhode Island) entwickelt wird. RAMICS arbeitet von Helikoptern aus. Mit Hilfe von LIDAR (*Light Detection and Ranging*, Lichtdetektion und -ortung), einem bildgebenden Lichtradar im blau-grünen Bereich, werden Wasserminen unter der Meeresoberfläche aufgespürt, trotz der Lichtbrechung an der Wasseroberfläche exakt geortet und schließlich mit Superkavitationssalven beschossen, die sowohl in Luft als auch in Wasser eine stabile Schussbahn beschreiben. In den Projektilen steckt eine spezielle Sprengladung, die dafür sorgt, dass die Mine ohne großen Schaden verpufft.



PHILIP HOWE

Letztlich diene der Schkwal dem Zerstören feindlicher U-Boote – insbesondere, wenn er mit einem taktischen Nuklearsprengkopf bestückt sei.

Andere informierte Kreise behaupten, es handele sich um eine Offensivwaffe, die einen größeren nuklearen Sprengsatz inmitten eines Flugzeugträgerverbandes zur Explosion bringen und dadurch einen gesamten Flottenteil vernichten solle. In einem Nuklearkrieg könnte der Torpedo sogar gegen einen Hafen oder ein küstennahes Landziel gerichtet werden.

„Da gegen eine solche Waffe keine Gegenmaßnahmen bekannt sind", schrieb David Miller im April 1995 in der Zeitschrift „Jane's Intelligence Review" unter dem Titel „Supercavitation: Going to War in a Bubble" (etwa: Superkavitation: Wie man in einer Blase in den Krieg zieht), „könnte ihre Stationierung wichtige Auswirkungen auf künftige Marineoperationen haben, sowohl über als auch unter Wasser, und den Flottenverbänden des Westens erhebliche Nachteile bringen".

In den letzten Jahren hat Russland, das bekanntlich knapp bei Kasse ist, den Schkwal-Torpedo auf internationalen Waffenmessen in Abu Dhabi und Athen offen zum Kauf angeboten – sehr zum Missfallen des Pentagons. Gut informierte Quellen behaupten beispielsweise, dass mehrere Schkwals an den Iran verkauft wurden.

Ebenso beunruhigend ist ein Bericht vom August 1998, wonach China rund vierzig Schkwal-Torpedos von Kasachstan gekauft haben soll. Damit könnte Peking im Krisenfall amerikanische Seestreitkräfte in der Straße von Taiwan bedrohen. Meldungen aus China, die von Informanten der US-Marine bestätigt worden sein sollen, besagten außerdem, an Bord der gesunkenen „Kursk" sei ein chinesischer U-Boot-Offizier gewesen – angeblich, um den Test einer neuen Schkwal-Version zu beobachten.

Der US-Geheimdienst hat mehrere Hinweise erhalten, dass Russland an einem verbesserten Modell der Schkwal mit deutlich größerer Reichweite arbeitet. Die russische Nachrichtenagentur Itar-Tass berichtete im Februar 1998, die russische Pazifikflotte habe vor, demnächst einen „modernisierten" Schkwal zu testen.

Der Untergang der „Kursk", der Pope-Spionageprozess und die ungeklärten Begleitumstände beider Ereignisse bestätigen, dass das Ende des Kalten Krieges keineswegs das Ende des geheimen Rüstungswettlaufs um einen Vorsprung bei etwaigen künftigen militärischen Konflikten bedeutet. Der russische Superkavitationstorpedo wird nicht die letzte Überraschung bleiben, die aus einem undurchsichtigen Meer von Geheimhaltung auftaucht.

Unterwasserraketen

Die US-Marine konzipiert auch schwere Superkavitationswaffen größerer Reichweite. Links eine „longrange guided preemptive weapon" (präventive Langstreckenlenkwaffe), rechts ein „midrange unguided engagement breaker" (ungelenkter Gefechtsbrecher mittlerer Reichweite).

PHILIP HOWE

Literaturhinweis

„Mit Überschall im Unterseeboot" von Frank Grotelüschen in: mare, Heft 24, Februar/März 2001.

*Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** unter „Aktuelles Heft".*

Inhalt

Mangelware Wasser

Verschwendung bedroht die Lebensgrundlage Wasser. Effektivere Techniken können den Trend aufhalten.

WASSER SPAREN

Jeder Tropfen zählt

Wir nutzen die Ressource Wasser, als ob uns unbegrenzte Mengen davon zur Verfügung stünden. Ein riskantes Spiel!

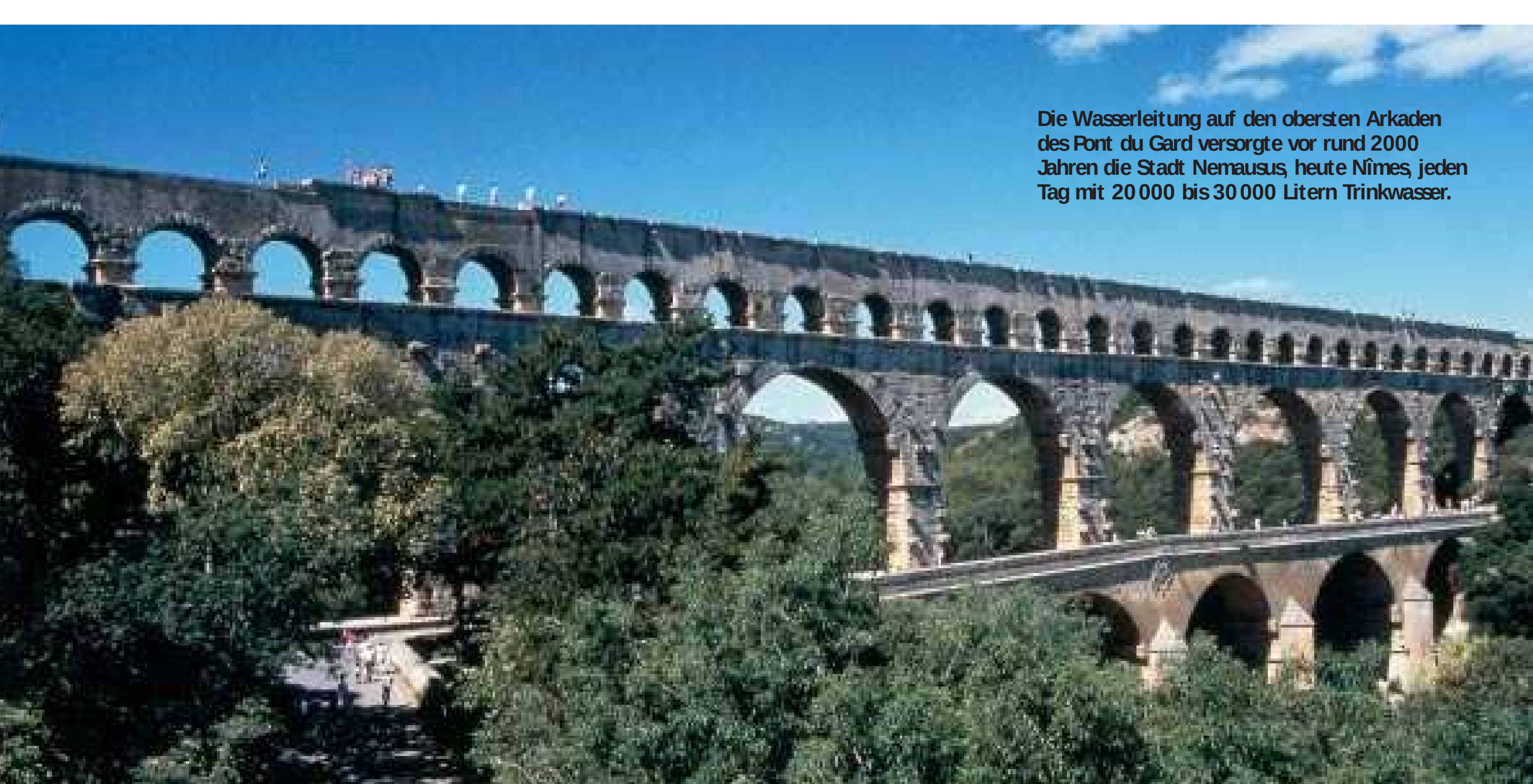
Von Peter H. Gleick

Ohne die Erfindung der Wasserleitung gäbe es unsere moderne Zivilisation nicht, und wir wären – wie die frühen Ackerbau-Kulturen – auf regelmäßige Regenfälle und ganzjährig Wasser führende Flüsse angewiesen. Erst die Erfindung der Bewässerungskanäle machte es möglich, auch in Trockengebieten und -zeiten die Felder zu bestellen. Dank Rohrleitungen können wir uns auch im 23. Stockwerk eines Wolkenkratzers oder in der Wüste die Hände unter fließendem Wasser waschen.

Bereits vor 5000 Jahren wurden die Siedlungen des Indus-Tals mit einem System aus Wasserleitungen und Abwasserkanälen ausgestattet. Athen und Pompeji unterhielten – wie die meisten Städte im antiken Griechenland und Rom – ein ausgeklügeltes System für die Wasserver- und -entsorgung. Technische Meisterleistungen wie Dämme und Aquädukte brachten das lebensnotwendige Nass selbst über weite Distanzen in die Städte (SdW 5/1989, S. 122). Zur Blütezeit ihres Reiches waren die Einwohner Roms an ein System aus Wasserrohren und Abwasserkanälen angeschlossen; ihr Pro-Kopf-Verbrauch entsprach dem unsrigen heute. Wasser bildete stets auch die Grundlage für Gewerbe und Industrie. Während der industriellen Revolution des 19. und 20. Jahrhunderts stieg die Nachfrage enorm.

Heutzutage befördern Rohrleitungen Trinkwasser über Hunderte oder Tausende von Kilometern, sodass sogar in der Wüste Städte erblühen. Ausgefeilte Bewässerungstechniken ermöglichen es, dass inzwischen weltweit 40 Prozent der Nahrungsmittel von künstlich bewässerten Anbauflächen stammen – und der Hunger von immer mehr Menschen gestillt werden kann. Dank Kanalisationen verloren auch die durch verunreinigtes Wasser verursachten Krankheiten wie Cholera und Typhus mancherorts ihren Schrecken. Schadstoffarme Kraftwerke, deren Turbinen von Wasser angetrieben werden, produzieren heute weltweit annähernd ein Fünftel der benötigten Elektrizität.

Doch die Idylle trügt. Heute noch lebt die Hälfte der Weltbevölkerung mit einer Wasserversorgung, die schlechter



Die Wasserleitung auf den obersten Arkaden des Pont du Gard versorgte vor rund 2000 Jahren die Stadt Nemausus, heute Nîmes, jeden Tag mit 20 000 bis 30 000 Litern Trinkwasser.

RAUCH / DPA



Wie in Somalia sind einige Menschen auch heute noch auf Wasser aus metertiefen Wasserlöchern angewiesen.

ist als die im antiken Rom. Der im November 2000 vorgelegte Bericht der Vereinten Nationen erinnert daran, dass über eine Milliarde Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben und etwa 2,5 Milliarden über keine ausreichenden sanitären Anlagen verfügen. Jeden Tag sterben schätzungsweise 10000 bis 20000 Kinder, die sich durch verunreinigtes Wasser infiziert haben. Das Bevölkerungswachstum in den Entwicklungsländern verschärft die Lage weiter.

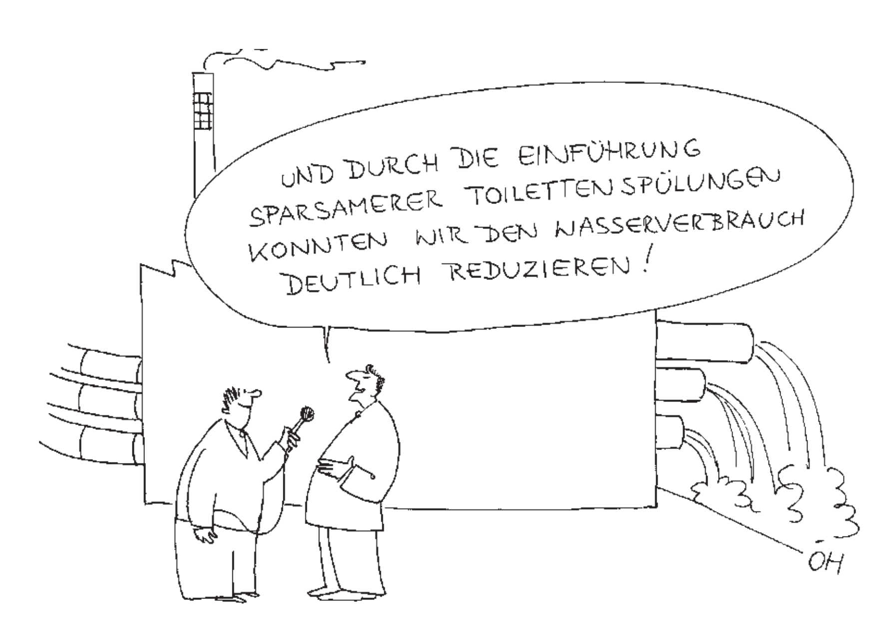
Aktuellen Untersuchungen zufolge gibt es sogar Rückschritte: Mitte der 1990er Jahre traten in Lateinamerika, Afrika und Asien massive Cholera-Epidemien auf – hätten die Menschen Zugang zu sauberem Wasser gehabt, wäre dies vermeidbar gewesen. Und in Bangladesch und Indien trinken Millionen von Menschen mit Arsen verseuchtes Wasser – eine ungewollte Spätfolge der „grünen Revolution“; denn die Hochleistungsreissorten müssen so stark bewässert werden, dass das von Natur aus im Boden enthaltene Arsen freigesetzt wird. Neben der Gesundheit leidet mitunter auch das Sozialgefüge der Gesellschaft: Um Platz für Stauseen zur Trinkwassergewinnung und Stromerzeugung zu schaffen, wurden nicht selten viele Millionen Menschen zwangsweise umgesiedelt – häufig ohne große Vorwarnung oder Entschädigung. Jahrtausende alte Ökosysteme werden beim Bau von Großprojekten zerstört, und die Landwirtschaft schädigt sich durch ineffiziente Bewässerung langfristig selbst: Ein Großteil des Wassers verdunstet, sodass der Boden versalzt, andernorts schwemmen die Wassermassen die Humusschicht weg. Folge der immer schlechteren Bodenqualität sind Ernteeinbußen, die auch der „grünen Revolution“ ein vorzeitiges Ende bereitet haben.

Darüber hinaus droht Wassermangel, denn durch den ausgiebigen Verbrauch des knappen Rohstoffs leeren sich gerade in den Trockengebieten die Grundwasserleiter schneller, als sie von der Natur wieder aufgefüllt werden – dies trifft insbesondere auf Teile Indiens und Chinas, aber auch der USA zu. Wird die Nachfrage größer als das Angebot, drohen ernste Konflikte: Seit Jahrhunderten münden Auseinandersetzungen um gemeinsam genutzte Wasservorräte mitunter in offene Gewalt und schüren lokale, nationale oder sogar internationale Spannungen (siehe Kasten auf Seite 72).

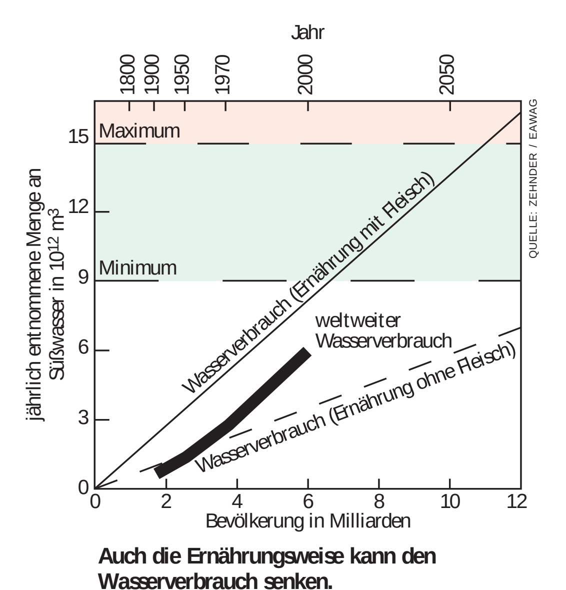
Inzwischen stehen bei Planungen die Bedürfnisse von Mensch und Umwelt zum Glück oft an erster Stelle. „Wenig für alle statt mehr für wenige“, fordert Kader Asmal, der frühere südafrikanische Minister für Wasser und Forsten. Dass Sparsamkeit nicht unbedingt die Lebensqualität beeinträchtigt, zeigt das Wassersparprojekt der Stadt New York (siehe Seite 79). Statt weitere Staudämme zu bauen oder Grundwasserleiter zu erschließen, reicht es oft aus, die bereits vorhandene Infrastruktur geschickter zu nutzen. Es gibt viele Möglichkeiten – sowohl für Industrieländer als auch für die nicht industrialisierten Nationen: Bessere Methoden zum Aufspüren undichter Stellen im Rohrleitungssystem, sparsamere Waschmaschinen, Tropfbewässerungssysteme oder speziell gezüchtete Pflanzensorten, die mit wenig Wasser auskommen, sind nur einige Beispiele.

Dass dies funktioniert, zeigt die Statistik: Zwischen 1900 und 1975 verdoppelte sich der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch an Süßwasser. Noch krasser war die Steigerung in den USA: Während sich die Bevölkerung vervierfachte, verzehnfachte sich die entnommene Wassermenge. Doch seit dem Höchststand von 1980 sank der Verbrauch durch neue Wasserspar-Techniken für Haushalt und Industrie um 20 Prozent. Auch weltweit nimmt der Pro-Kopf-Verbrauch an Wasser ab, in einigen Teilen der Welt sogar der absolute Verbrauch – trotz steigender Bevölkerungszahl und Industrieproduktion.

Die schnellste und billigste Lösung, um dem Wassermangel zu begegnen, wäre es, die bereits vorhandenen Sparmöglichkeiten weiter auszubauen. Denn in den Haushalten wird das Wasser häu- ▶



BULLATY / LOMEO / IMAGE BANK



Auch die Ernährungsweise kann den Wasserverbrauch senken.

fig im wahrsten Sinne des Wortes „das Klo hinunter gespült“: Bis vor zehn Jahren benötigten New Yorker Toiletten etwa 22 Liter Trinkwasser pro Spülung, seit 1992 wurde die Menge per Gesetz auf maximal sechs Liter begrenzt. Einige amerikanische Städte halten die Wasserersparnis für so bedeutsam, dass sie die Umstellung mit speziellen Programmen fördern. Auch in Entwicklungsländern spielen technische Neuerungen eine Rolle: Statt verzweifelt nach nicht vorhandenen Quellen zu suchen, rief etwa die Stadtverwaltung von Mexico City ein ähnliches Sparprogramm ins Leben: Sie tauschte dabei unter anderem 350 000 Toiletten aus. Die dadurch eingesparte Wassermenge reichte aus, um weitere 250 000 Einwohner zu versorgen.

Gleichzeitig macht es Sinn, die tiefer liegenden Ursachen anzugehen, denn schon bevor das Wasser den Verbraucher erreicht, geht viel verloren: In vielen Ländern der Erde versickert über ein Drittel des Trinkwassers aus undichten Rohrleitungen, defekten Geräten oder schlecht gewarteten Verteilungssystemen. Aktuelle Schätzungen ergaben, dass die aus dem Leitungssystem von Mexico City verloren gegangene Menge Wasser ausreichen würde, um den Bedarf einer Stadt der Größe Roms zu decken. Selbst in den moderneren Systemen der Industrieländer seien Verluste von zehn bis zwanzig Prozent der Wassermenge an der Tagesordnung.

Auch die Menge Wasser, die von der Industrie genutzt wird, gilt es zu minimieren: Durch die Nachfrage nach gewissen Produkten und Dienstleistungen kann jeder Verbraucher mitentscheiden, welche sich lohnen und welche nicht. Weitere Sparmöglichkeiten bieten die modernen Herstellungsverfahren: Für die Produktion von beispielsweise einer Tonne Stahl wurden vor dem Zweiten Weltkrieg 60 bis 100 Tonnen Wasser benötigt, heute kann dieselbe Menge mit weniger als sechs Tonnen Wasser erzeugt werden. Für die Produktion von einer Tonne Aluminium werden sogar nur 1,5 Tonnen Wasser benötigt. Wenn im Fahrzeugbau der Stahl auch weiterhin durch Aluminium ersetzt wird, sinkt demnach auch der Wasserbedarf. Ein zweites Beispiel: Selbst wenn man das Wasser einrechnet, das benötigt wird, um einen Computer herzustellen, kann Telearbeit hunderte Liter Wasser einsparen – die ansonsten erforderlich wären, um einen Liter Benzin zu produzieren, auszuliefern und zu verkaufen.

Streit ums Süßwasser

Nicht nur die Historiker, auch Mythen und Legenden erzählen seit dem Altertum von Streitereien um die Süßwasservorräte. Mesopotamische Schriftrollen beispielsweise deuten an, dass die Städte Umma und Lagash vor etwa 4500 Jahren wegen der Herrschaft über die Bewässerungskanäle aneinander gerieten.

AP PHOTO



1999 wurde die Wasserleitung der jugoslawischen Stadt Novi Sad zerstört.

1924: USA

Farmer aus dem Umland verüben mehrfach Sprengstoffanschläge auf das Aquädukt von Los Angeles. Sie wollen verhindern, dass Wasser aus dem Owens Valley nach Los Angeles abgeleitet wird.

1947 bis 1960: Indien und Pakistan

Bei der Teilung von Britisch-Indien in Indien und Pakistan wurde das Wasser des Indus-Tals sehr ungeschickt aufgeteilt. Konflikte waren die Folge; einmal sperrte Indien sogar den Zulauf der pakistanischen Bewässerungskanäle. Nach zwölfjährigen Verhandlungen legte 1960 ein Vertrag den Streit bei.

1958: Ägypten und Sudan

Noch während der Verhandlungen über das Nilwasser und Regionalpolitik sendet Ägypten Truppen in ein auch vom Sudan beanspruchtes Grenzgebiet. Erst der Abschluss eines Nilwasser-Vertrags 1959 löst die Spannungen.

60er/70er Jahre: Israel, Jordanien und Syrien

Die Konflikte wegen der Wasserzuteilung, Überwachung und Umleitung der Flüsse Yarmouk und Jordan halten bis zum heutigen Tage an.

1990: Südafrika

Nach Protesten gegen die elenden sanitären Verhältnisse und Lebensbedingungen im Township Wesselton stellt ein Kommunalrat, der die Apartheidspolitik unterstützt, den 50 000 schwarzen Einwohnern das Wasser ab.

1991: Irak

Während des Golfkriegs zerstört der Irak die Entsalzungsanlagen Kuwaits. Eine Uno-Koalition erwägt, den Zufluss des Euphrats in den Irak zu sperren: Der Atatürk-Staudamm der Türkei hätte diesen Plan möglich gemacht.

1991 bis heute: Indien

Wegen unterschiedlicher Ansichten, wie das Wasser aus dem Fluss Cauvery gerecht zugeteilt werden kann, brechen zwischen den indischen Bundesstaaten Karnataka und Tamil Nadu immer wieder bewaffnete Konflikte aus. Schätzungsweise fünfzig Menschen sind dabei bislang ums Leben gekommen.

1999: Jugoslawien

Die Nato legt die Wasserversorgung Belgrads lahm und bombardiert Brücken der Donau; damit wird die Flussschifffahrt lahm gelegt.

Wasser im Jahr 2025

Obwohl sich der Pro-Kopf-Verbrauch an Wasser in den vergangenen hundert Jahren weltweit lediglich verdoppelte, hat sich der Gesamtverbrauch in dieser Zeitspanne verneunfacht – eine Folge von Bevölkerungswachstum und Industrialisierung. Die Prognosen für das Jahr 2025 lassen befürchten, dass mehr als 40 Prozent der dann 7,2 Milliarden Menschen mit Versorgungsengpässen zu kämpfen haben werden. Auch einige Landstriche ansonsten wasserreicher Länder – wie der USA und China – sind davon bedroht.

JOHNNY JOHNSEN; QUELLE: PETER H. GLEICK

IM ÜBERFLUSS
Über 1,7 Millionen Liter Wasser pro Person. Die Probleme beschränken sich auf einzelne Regionen und Jahreszeiten. 59,3 Prozent der Weltbevölkerung.

BEGRENZT
1 bis 1,7 Millionen Liter Wasser pro Person. Einschränkungen bei der Versorgung mit landwirtschaftlichen Produkten. 32,6 Prozent der Weltbevölkerung.

KNAPP
0,5 bis 1 Million Liter Wasser pro Person. Ständige Einschränkungen für Landwirtschaft und Industrie. 5,3 Prozent der Weltbevölkerung.

NICHT AUSREICHEND
Weniger als 0,5 Millionen Liter Wasser pro Person. Teilweise ernsthafte Gefahr für Landwirtschaft, Industrie und Gesundheit. 2,8 Prozent der Weltbevölkerung

Stellenweise von ernstem Wassermangel bedroht

Das meiste Wasser wird in der Landwirtschaft verwendet – und zwar ausgesprochen ineffizient. Schon auf dem Weg zu den Höfen und beim Ausbringen auf die Felder geht die Hälfte des kostbaren Rohstoffes verloren. Bei der Verteilung auf den Feldern verdunstet oder versickert viel, ohne je den Pflanzen zu Gute zu kommen. Bereits bescheidene Verbesserungen könnten riesige Mengen wieder zur Verfügung stellen (siehe Seite 74). Im Vergleich zu herkömmlichen Bewässerungsmethoden sparen beispielsweise die neuen Tropfsysteme in der Tomatenproduktion schätzungsweise 40 Prozent Wasser.

Sogar unsere Ernährungsgewohnheiten wirken sich auf den Wasserverbrauch der Landwirtschaft aus: Um ein Kilogramm Mais zu erzeugen, benötigen Bauern je nach Boden, Klima und Bewässerungsmethode zwischen 750 und 1900 Liter Wasser. Wird der Mais jedoch nicht verzehrt, sondern verfüttert, kostet ein Kilogramm Rindfleisch insgesamt zwischen 15 000 und 65 000 Liter Wasser – eine Menge, die mehrere hundert Badewannen füllen könnte.

Weiterhin stellt sich die Frage, warum das gesamte Wasser Trinkwasserqualität haben muss – für manche Zwecke reicht schließlich auch solches minderer Qualität. Statt das Abwasser in einen Fluss oder See zu leiten – in ärmeren Ländern häufig sogar ungeklärt – kann es auch für die Industrie, zur Bewässerung von Nutzpflanzen oder sogar zur Ergänzung der Grund- oder Trinkwasservorräte aufbereitet werden. So werden in Israel 70 Prozent der städtischen Abwässer für Nutzpflanzen verwendet, die nicht der Ernährung des Menschen dienen; das benachbarte Jordanien versucht in ähnlicher Weise mehr aus seinem Abwasser zu machen. Auch in Kalifornien wurden Mitte der 1990er jährlich rund 600 Milliarden Liter ehemaliges Abwasser genutzt, um Gärten, Parks, Golfplätze und Felder zu bewässern, Grundwasservorräte aufzufüllen, sowie für die Industrie oder die WC-Spülung. Am weitesten ging Namibias Hauptstadt Windhoek: Hier wird seit 1968 das Trinkwasser mit geklärtem Abwasser aufgestockt – in trockenen Jahren mit einem Anteil von bis zu 30 Prozent (siehe Seite 79).

Die neuen Wassersparmethoden in die Tat umzusetzen, wird nicht leicht, denn noch immer fördern die alten Strukturen sowohl die Verschwendung von Wasser als auch die Zerstörung der Ökosysteme: Unangemessen niedrige Wasserpreise, lückenhafte oder fehlende Informationen über die neuen effizienteren Technologien, eine ungerechte Verteilung des Wassers sowie Subventionen für den Bau von Staudämmen oder den Anbau stark Wasser verbrauchender Pflanzen in Trockengebieten sind nur einige Hindernisse für einen sinnvolleren Umgang mit dem kostbaren Nass. Statt weiter nach neuen Quellen zu suchen, ist es an der Zeit, einen Weg zu finden, unseren Bedarf mit derjenigen Menge Wasser zu decken, die zur Verfügung steht. Ebenso entscheidend ist es, die ökologischen Kreisläufe zu schützen, die so unerlässlich für das menschliche Wohlbefinden sind. Umdenken ist gefragt – bei der Bevölkerung wie auch den Wasserplanern. Doch solch große Veränderungen geschehen nur allmählich. ■

Literaturhinweise

The World's Water 2000–2001. Von Peter H. Gleick. Island Press, 2000.

International River Basins of the World. Von Aaron T. Wolf et al. in: Water Resources Development 15, Bd. 4, S. 387, 1999.

Peter H. Gleick *ist Direktor des Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security in Oakland (Kalifornien). Als führender Experte im Bereich Umweltsicherung und Süßwasserreserven ist er Mitglied in zahlreichen Ausschüssen.*

LANDWIRTSCHAFT

Mehr ernten mit weniger Wasser

Ohne künstliche Bewässerung ließe sich die Weltbevölkerung nicht ernähren, doch die Ressourcen schwinden.

Von Sandra Postel

Als vor 6000 Jahren sumerische Bauern Kanäle aushuben, um das Wasser des Euphrats auf ihre Felder zu leiten, begründeten sie damit die erste Kultur der Menschheitsgeschichte, deren Erfolg auf künstlicher Bewässerung beruhte. Etwa 2000 Jahre lang ernteten sie Weizen und Gerste im Überfluss. Doch ein Großteil des Flusswassers gelangt bei solcher Bewässerung erst gar nicht zu den Pflanzen, es verdunstet. Darin gelöste Verunreinigungen bleiben auf den Feldern zurück, der Boden versalzt und wird zunehmend unfruchtbar – nach Meinung vieler Historiker war dies ein Grund für den Untergang der sumerischen Gesellschaft.

Weltweit werden heutzutage etwa 40 Prozent der pflanzlichen Nahrungsmittel auf bewässerten Böden angebaut, das entspricht 18 Prozent der gesamten Agrarfläche. Dank Bewässerung fahren Landwirte jedes Jahr zwei bis drei ertragreiche Ernten ein. Dadurch hat sich die Weltgetreideproduktion seit 1950 nahezu verdreifacht.

Inzwischen werden zwei Drittel des insgesamt verbrauchten Wassers auf Felder ausgebracht, in vielen Entwicklungsländern gar bis zu 90 Prozent. Wenn im Jahr 2025 – wie erwartet – acht Milliarden Menschen ernährt werden müssen, dürfte der Bedarf der Landwirtschaft um weitere 786 Kubikkilometer steigen – zehnmal mehr, als pro Jahr den Nil hinabfließt. Noch weiß niemand, woher diese Menge genommen werden soll, ohne gleichzeitig die Reserven zu gefährden.

Extremer Süßwassermangel gilt daher als die entscheidende Bedrohung für die Lebensmittelproduktion der Zukunft. Bereits jetzt werden Grundwasser führende Gesteinsschichten und Flüsse oft über das vernünftige Maß hinaus ausgebeutet. Acht Prozent der Nahrungspflanzen stammen aus landwirtschaftlichen Betrieben, die Reservoire schneller leeren, als sich diese wieder auffüllen. Vielen Flüssen wird so viel Wasser entzogen, dass sie während eines großen Teils des Jahres das Meer nicht mehr erreichen. Für das Jahr 2025 rechnen Statistiker mit über fünf Milliarden Städtern – dadurch konkurrieren Landwirte mehr und mehr mit der kommunalen Wasserversorgung und der Industrie.

Um die weltweit zusätzlich benötigten Nahrungsmittel zu produzieren, setzen Agrarexperten trotz ungelöster Probleme auf die künstliche Bewässerung. Dabei könnten bereits ein besserer Umgang mit den Ressourcen und einfallsreiche Anbaumethoden die Erträge des ausschließlich mit Niederschlägen bewässerten Ackerlandes steigern.

Zudem gibt es viele Möglichkeiten, das kostbare Nass in der Landwirtschaft effektiver einzusetzen. Bislang fluten die meisten Bauern ihre Felder komplett oder leiten das Wasser in offene Furchen. Doch die Pflanzen nehmen nur einen kleinen Teil davon auf, der Rest verdunstet, versickert oder fließt in Bäche und Flüsse. Diese vielerorts übliche Praxis vergeudet oder verunreinigt nicht nur einen wichtigen Rohstoff. Wie einst im alten Sumer degeneriert der Boden durch Staunässe, versalzt oder wird weggeschwemmt. Dabei gibt es die wirksameren und umweltverträglicheren Technologien bereits: Möglicherweise können sie den Wasserbedarf der Landwirtschaft sogar halbieren.

Besonders viel versprechend sind Tropfbewässerungssysteme: Mit niedrigem Druck fließt das Wasser durch ein Netzwerk perforierter, über oder unter der Erdoberfläche verlegter Plastikschläuche. Fast ohne Verluste gelangt es Tropfen für Tropfen direkt zu den Wurzeln, und der Wasserverbrauch sinkt um 30 bis 70 Prozent. Da die Pflanzen zudem in einer für sie optimal feuchten Umgebung wachsen, steigen gleichzeitig die Ernteerträge – oft um 20 bis 90 Prozent, wie in Indien, Israel, Jordanien, Spanien und den USA durchgeführte Studien zeigen.

Optimierte Beregnungsanlagen sind ähnlich wirkungsvoll. Während konventionelle Systeme das Wasser in hohem Bogen versprühen – und dabei ein großer Teil verdunstet oder verweht –, geben die neuen Anlagen es in geringerer Menge direkt über der Erde ab. Versuchsweise installierten einige texanische Farmer solche Anlagen: Sie beobachteten, dass die Pflanzen 90 bis 95 Prozent des Dargebots aufnahmen.



WOLFGANG KAEHLER / CORBIS / PICTURE PRESS

Bei der traditionellen Bewässerung werden die Ackerfurchen geflutet. Doch dabei verdunstet und versickert ein Großteil der immer knapper werdenden Ressource, ohne den Pflanzen zu nutzen.

Trotz der eindrucksvollen Ergebnisse werden solche Beregner weltweit nur auf 10 bis 15 Prozent der bewässerten Anbauflächen genutzt, die Tropfbewässerungssysteme sogar nur auf etwas mehr als einem Prozent. Da sie teurer sind als die einfache Flutung der Felder, konnten sich diese Technologien bisher nicht durchsetzen. Auch die Wasserpolitik vieler Staaten fördert den sparsamen Umgang mit Wasser nicht gerade. Viele Regierungen halten die Wasserpreise nach wie vor niedrig, sodass Landwirte wenig Interesse haben, ihre Ressourcen zu schonen oder in effektivere Techniken zu investieren. Selbst in Gebieten, in denen der Grundwasserspiegel bereits sinkt, versäumen es die meisten Behörden, die Nutzung einzuschränken. Vielleicht würden die Bauern umdenken, wenn sie vom Verkauf der Überschüsse profitierten – doch in zahlreichen Ländern wird diese Praxis erschwert oder gar verboten.

Hilfe für die armen Länder

Neben neuen Technologien gibt es in der Landwirtschaft weitere viel versprechende Möglichkeiten, kostbares Wasser zu sparen. Beispielsweise können die Pflanzen nach Bedarf bewässert werden: Unter Berücksichtigung von Klimadaten wie Temperatur und Niederschlag errechnet ein Computerprogramm, wann und mit welcher Menge der Landwirt seine Felder bewässern muss. Einem 1995 von der Universität von Kalifornien in Berkeley erstellten Gutachten zufolge sparten kalifornische Landwirte mit dieser Methode im Schnitt 13 Prozent Wasser – und ihre Ernteerträge stiegen um acht Prozent.

Die nahe liegendste Art, etwas möglichst effektiv zu nutzen, besteht darin, es mehrfach zu verwenden. In der israelischen Landwirtschaft beispielsweise werden 30 Prozent des Wasserbedarfs durch wiederaufbereitetes Abwasser gedeckt, bis zum Jahr 2025 soll der Anteil auf 80 Prozent steigen.

Auch durch Züchtung neuer Sorten mit geringerem Wasserverbrauch lassen sich die Erträge steigern. Hybridweizen und neue Reissorten beispielsweise zweigen einen größeren Anteil der Energie – und damit auch des aufgenommenen Wassers – für den Aufbau von Ähren und Rispen ab als die alten Sorten. Dadurch steigt der Getreideertrag. Beim Reis hat der Einsatz früh ansetzender Hochertragssorten den Wasserverbrauch pro Einheit auf ein Drittel reduziert. Doch damit haben die Agrarwissenschaftler die aussichtsreichsten Methoden ausgeschöpft: Weder die herkömmlichen Züchtungsmethoden noch die Gentechnik können zur Zeit eine vergleichbare Zunahme bewirken, lediglich bescheidene Verbesserungen können erzielt werden.

Eine weitere Möglichkeit, Ressourcen zu schonen, dürfte keine große Popularität erfahren, obwohl sie unbedingt notwendig ist: die Änderung der Ernährungsgewohnheiten (siehe Grafik auf Seite 72). Insbesondere entwickelte Länder schätzen oft einen hohen Anteil an Tierprodukten, doch die verschlingen bei ihrer Erzeugung doppelt so viel Wasser wie eine fleischarme Ernährung.

So notwendig es ist, den Wasserverbrauch der Landwirtschaft zu senken – die hungernde Bevölkerung der Trockengebiete benötigt dringend zusätzliche Bewässerungsanlagen. Viele der weltweit etwa 800 Millionen unterernährten Menschen könnten vom Zugang zu Wasser beziehungsweise zu effektiveren Bewässerungstechniken profitieren.

Die meisten dieser Menschen leben in Asien und Afrika – Ländern, in denen der Anbau von Nahrungsmitteln durch lange Dürreperioden erschwert wird beziehungsweise ohne Bewässerung gar nicht möglich ist. Für ihre kleinen, in der Regel weniger als zwei Hektar umfassenden Anbauflächen sind die herkömmlichen Bewässerungstechniken zu teuer. Selbst die relativ preiswerten, zum Anzapfen des Grundwassers geeigneten Motorpumpen kosten noch um die 350 Dollar. Damit sind sie für viele Bauern – die so viel nicht einmal in einem Jahr verdienen – unbezahlbar. In Regionen, in denen erschwingliche Geräte zur Verfügung stehen, werden diese allerdings ausgesprochen profitabel eingesetzt.

Um einen dieser Erfolge aus erster Hand mitzuerleben, besuchte ich 1998 Bangladesch. Sturzbachartige Regenfälle tränken dieses Land während der Monsunmonate, doch im Laufe des restlichen Jahres fallen kaum Niederschläge. Obwohl sich der Grundwasserspiegel weniger als sechs Meter unter der Oberfläche befindet, liegen viele Felder in der Trockenzeit brach.

Seit 17 Jahren wird ein großer Teil des Landes mit Hilfe von Tretpumpen in ganzjährlich bebaubares und fruchtbares Ackerland verwandelt. Den Besucher aus der westlichen Wohlstandsgesellschaft erinnert dieses Gerät an einen Stepper aus dem Fitness-Studio: Der Benutzer tritt zwei lange Bambusstangen – beziehungsweise Trittbretter – auf und ab und bewegt damit zwei Stahlzylinder. Die Sogwirkung zieht das Grundwasser abwechselnd in die Zylinder und schüttet es in einen zum Feld führenden Kanal. Mit diesem einfachen Mechanismus bewässern viele Familien ihre Reissetzlinge und Gemüsebeete. Sie erzählten mir, dass sie die Pumpe häufig vier bis sechs Stunden am Tag bedienen. Doch die harte Arbeit zahlt sich aus: In der Trockenzeit müssen sie nicht mehr hungern, oft können sie sogar ihre Gemüseüberschüsse auf dem Markt verkaufen.



SCHOLZ / DPA

Techniken wie die Tropfbewässerung halbieren den Wasserbedarf der Landwirtschaft.

Literaturhinweise

Groundwater in Rural Development. Von S. Foster et al. in: Technical Paper Nr. 463, Weltbank, Washington D.C., 2000.

Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture. Von T. Jacobsen und R. M. Adams in: Science 128, 1958, S. 1251.

*Weblinks bei **www.spektrum.de** unter „Aktuelles Heft“*



INTERNATIONAL DEVELOPMENT ENTERPRISES, DENVER

Mit preiswerten Tretpumpen können auch arme Bauern ihre Felder bewässern.

Bei Anschaffungskosten von weniger als 35 Dollar pro Stück steigerte die Tretpumpe das durchschnittliche Nettoeinkommen der Bauern – das oft nur einen Dollar am Tag beträgt – um hundert Dollar im Jahr. Bis heute erwarben die Landwirte Bangladeschs etwa 1,2 Millionen dieser Geräte und erhöhten damit auf fast 25000 Quadratkilometer Ackerland ihre Erträge. Über 350 Millionen Dollar brachten die im eigenen Land hergestellten und vermarkteten Pumpen der Wirtschaft Bangladeschs pro Jahr zusätzlich ein.

In anderen Trockengebieten profitieren verarmte Landwirte von neu entwickelten preiswerten Tropfbewässerungssystemen. Angefangen mit einer Ausrüstung für den Hausgarten zu fünf Dollar wurde ein ganzes Spektrum für die unterschiedlichsten Hofgrößen und Einkommensniveaus entwickelt. 1998 sprach ich mit Bauern des unteren Himalaya in Nordindien, wo die Feldfrüchte auf terrassenförmig angelegten Feldern mit dem wenigen von der Gemeinde zugeteilten Wasser gedeihen. Mit Hilfe der Anlagen erhoffen die Bauern, ihre Anbaufläche zu verdoppeln.

Die Verbreitung der preiswerten Systeme kann jedoch nur gelingen, wenn die gesamte Versorgungskette – von der Herstellung über Vertrieb bis zur Installation – vor Ort in privater Hand liegt. Dabei sind auch innovative Vermarktungsstrategien notwendig. In Bangladesch war die Tretpumpe auch deshalb so erfolgreich, weil sie von heimischen Geschäftsleuten hergestellt und vertrieben wurde – und weil sich die Marketingexperten mit einfallsreichen Methoden an die Landbevölkerung wandten: Sie zeigten einen Open-Air-Film oder führten das Produkt im Dorf vor. Wenn die für kleine Höfe entwickelten erschwinglichen Bewässerungstechniken weiter verbreitet werden, hält es Paul Polak, Präsident der International Development Enterprises in Lakewood (Colorado), für realistisch, Hunger und Armut der 150 Millionen ärmsten auf dem Land lebenden Menschen innerhalb von 15 Jahren zu lindern.

All diese neuen Technologien können helfen, immer mehr Menschen zu ernähren und trotzdem Flüsse, Seen und Grundwasser zu schonen. Doch darf die Anstrengung nicht allein zu Lasten der Entwicklungsländer gehen: Weitreichende Änderungen in der Gesellschaft – wie zum Beispiel reduzierter Konsum – sind notwendig. Der Untergang der sumerischen Kultur sollte uns mahnen. ■

Sandra Postel *leitet das Global Water Policy Project in Amherst (Massachussetts) und ist Gastdozentin für Umweltwissenschaften am Mount Holyoke College. Sie ist führendes Mitglied des Worldwatch Instituts.*

TRINKWASSERQUALITÄT

Vater Rhein – ein Fluss gesundet

Schlechte Wasserqualität war einst das Problem unseres größten Flusses. Inzwischen gilt der Rhein als Beispiel einer gelungenen Sanierung.

Von Klaus Jacob

In Deutschland herrscht an Wasser kein Mangel. Die Wasserwerke könnten Jahr für Jahr 180 Milliarden Kubikmeter aus Brunnen, Quellen und Flüssen schöpfen, benötigen aber nur rund 50 Milliarden Kubikmeter, wovon Industrie und Landwirtschaft 87 Prozent nutzen. Auch in Zukunft droht kein Engpass: Klimatologen prophezeien für Zentraleuropa im Zuge der weltweiten Erwärmung eine Zunahme der Niederschläge. Vor allem im Winter soll es häufiger regnen und schneien, sodass Überschwemmungen mehr Sorgen bereiten als Dürren.

Doch mit der Qualität des Wassers hapert es: Durch viele Flussbetten strömt dreckige Brühe, und ins Grundwasser sickern Industriegifte, Pestizide, Herbizide und Düngemittel. Und das, obwohl die Zeiten der schlimmsten Umweltsünden vorbei sind. Geradezu ein Musterbeispiel für die Fortschritte in Sachen Umweltschutz wie für die noch anstehenden Probleme bietet der Rhein, einer der bestuntersuchten Flüsse weltweit, der seine Rolle als Trinkwasserlieferant auch in trüben Zeiten nie verloren hat.

Er verbindet als europäische Wirtschaftsachse die Schweiz, Deutschland, Frankreich und die Niederlande. Sein Einzugsgebiet teilen sich zudem noch Italien, Liechtenstein, Österreich, Luxemburg und Belgien. 50 Millionen Menschen wohnen auf diesen 185000 Quadratkilometern, und 20 Millionen beziehen ihr Trinkwasser aus dem Rhein, meist aus Uferfiltrat, also aus flussnahem Untergrund. An seinen Ufern stehen Industriewerke dicht an dicht, darunter die Chemie- und Pharmariesen BASF, Bayer, Novartis und Hoechst – die größte Dichte solcher Unternehmen weltweit. Auch bei der Schifffahrt glänzt der Fluss mit Rekorden: In Duisburg hat er den größten Binnen- und in Rotterdam den größten Seehafen der Welt.

Könnte ein Zeitgenosse Goethes heute den Oberlauf zwischen Basel und Bingen bereisen, er würde den Rhein nicht wiedererkennen. Aus einem reich mäandrierenden Strom mit weitläufigen Auenlandschaften, mit Prall- und Gleithängen, Sand- und Kiesbänken ist ein geradliniger, befestigter Kanal geworden. Längst vorbei sind die Zeiten, als es genügte, das Wasser zu filtern, um es als Lebensmittel aufzubereiten. Auch das Spektrum der Tierarten, die im Fluss leben, hat sich erheblich reduziert. Vor 200 Jahren tummelten sich noch 800 bis 1000 Arten von Kleinlebewesen im Rhein, wie Biologen aus Fossilien und zeitgenössischer Literatur herausgelesen haben. Heute sind es

nur noch rund 200. Positiver Nebeneffekt: Auch die Moskitos sind verschwunden, die noch zur Zeit des Dichterfürsten Malaria übertrugen.

Der Niedergang der Urstromlandschaft begann Mitte des 19. Jahrhunderts. Mit der Begradigung, die dem badischen Ingenieur Tulla den Beinamen „Bezwinger des Rheins“ einbrachte, verschwand ein Großteil der Auen – und mit ihnen viele Tierarten. Zugleich begannen die Städte, ihren Unrat über eine Kanalisation zu entsorgen und das Abwasser ungeklärt in den Rhein zu leiten. Obendrein belasteten immer mehr Industriebetriebe das Wasser mit Salzen, Schwermetallen und organischen Spurenstoffen. Und aus den Feldern sickerten Pflanzenschutzmittel sowie Stickstoff- und Phosphor-Nährstoffe in das Gewässer.



Nach dem Zweiten Weltkrieg konnte der Fluss zwar noch einmal kurz aufatmen, weil viele Industriebetriebe zerstört waren. Doch mit dem einsetzenden Wirtschaftswunder verkam der Rhein vollends zur Kloake. Schaumberge hinter den Staustufen machten das Desaster für jedermann sichtbar. In den sechziger und frühen siebziger Jahren, als die Verschmutzung ihren Höhepunkt erreichte, lebten kaum noch 30 Arten von Kleintieren im Fluss. Der im Wasser gelöste Sauerstoff wurde selbst für diese Überlebenskünstler knapp. Im trockenheißen Sommer 1971, als der Rhein besonders wenig Wasser führte, drohte der Kollaps. Der Sauerstoffgehalt sank unter die kritische Marke von vier Milligramm pro Liter, die für höheres Leben nötig ist. Bei Koblenz wurde 24 Stunden lang überhaupt kein Sauerstoff gemessen. Damals verendeten zwischen der Main-Mündung und Köln unzählige Tiere.

Verheerend wirkte sich auf diesen hochbelasteten Strom jeder Störfall in einem Industriebetrieb aus, der auf einen Schlag erhebliche Mengen Schadstoffe in den Rhein schwemmte. Als im Juni 1969 Insektizide aus unbekannter Quelle in den Main gelangten, starben bis zur niederländischen Grenze Millionen Fische, ein Großteil des Bestandes. 17 Jahre später, am 1. November 1986, trieben abermals unzählige Fische mit dem Bauch nach oben. Bei der Schweizer Pharmafirma Sandoz war eine Lagerhalle in Brand geraten, und das Löschwasser hatte 10 bis 30 Tonnen Pestizide in den Rhein gespült. Die Giftfahne, die bis in die Niederlande nachgewiesen wurde, vernichtete allein mehrere 100 000 Aale. Der Bestand ging auf einer Flusslänge von 500 Kilometern völlig zu Grunde, von Basel bis Koblenz. Die Wasserwerke längs des Rheins stoppten vorsorglich ihre Wasserentnahme. So blieb wenigstens das Trinkwasser unbelastet.

Das Sandoz-Desaster hatte in der Öffentlichkeit empörte Proteste ausgelöst ▶

PETER BIRMANN (1758–1844), ÖFFENTLICHE KUNSTSAMMLUNG BASEL, KUNSTMUSEUM; FOTO: MARTIN BÜHLER



HAHL / DPA



Im 19. Jahrhundert floss der Rhein durch tausend Quadratkilometer Auenlandschaft; links eine Ansicht vom Isteinerklotz rheinaufwärts gegen Basel. Heute ist davon nur wenig übrig: Die Auen fielen Verbauung, Landwirtschaft oder Kiesabbau zum Opfer (oben die Rheinaue bei Lampertheim mit dem Naturschutzgebiet „Biedensand“).



BAUMGÄRTNER

Fischtreppen wie hier bei Iffezheim ermöglichen es dem Lachs und anderen Tieren, zum Laichen den Fluss aufwärts zu wandern. Flussabwärts müssen die Jungtiere allerdings durch die Turbinen.

und die Politiker aufgerüttelt. Vor allem die 119 Rheinwasserwerke zwischen der Schweiz und den Niederlanden drängten darauf, den Fluss wirkungsvoller zu schützen und die Wasserqualität zu verbessern. Schließlich sind sie auf halbwegs sauberes Wasser angewiesen. Bereits im darauf folgenden Jahr, am 1. Oktober 1987, unterzeichneten die Rhein-Minister den so genannten „Aktionsplan Rhein" und verknüpften ihn mit dem ehrgeizigen Ziel, den Lachs bis zur Jahrtausendwende wieder anzusiedeln. Der Wanderfisch, von dem die Rheinfischer im Jahr 1885 noch 250 000 Exemplare gefangen hatten und dessen letzte Vertreter im Jahr 1958 gesichtet worden waren, stellt hohe Ansprüche an die Wasserqualität – der Grund, weshalb er zum Bannerträger des Umweltprogramms gewählt wurde.

Heute gilt der Rhein als Paradebeispiel einer gelungenen Sanierung. Andere Flüsse – wie etwa die Weser – sollen seinem Beispiel folgen. Selbst der Leiter des WWF-Auen-Instituts in Rastatt, Emil Dister, spricht von einer „dramatischen Verbesserung der Wasserqualität". Der Rhein habe einen Zustand wie in den zwanziger und dreißiger Jahren erreicht. Aus dem schwer kranken Strom ist ein Rekonvaleszent geworden, in dem an heißen Sommertagen mancher unerschrockene Anwohner wieder badet. Fast alle 45 Fischarten, die vor 200 Jahren darin lebten, sind zurückgekehrt. Sie finden zwar keinen optimalen, aber einen erträglichen Lebensraum vor: Der Sauerstoffgehalt erreicht vom Bodensee bis zur Nordsee das ganze Jahr über ein passables Niveau, und die Schadstoffkonzentrationen gingen seit 1985 drastisch zurück.

Die Erholung ist vor allem dem Bau hochwirksamer mechanisch-biologischer Kläranlagen zu verdanken. Kaum noch ein abgelegener Weiler oder Einödhof im riesigen Einzugsgebiet, der nicht an die öffentliche Kanalisation angeschlossen ist. Außerdem haben die Industriebetriebe große Summen in die Abwasserreinigung investiert. Ein aufwendiger Warn- und Alarmdienst sorgt außerdem dafür, dass sich eine Katastrophe wie die von Sandoz aller Wahrscheinlichkeit nach nicht wiederholen wird.

Unsichtbare Feinde

Sogar der Traum vom Lachs im Rhein scheint wahr zu werden. Die Anliegerstaaten haben unter der Leitung der „Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins" (IKSR) alle in Frage kommenden Laichgewässer im Rhein-Einzugsgebiet kartiert und präpariert, haben Millionen junger Salmoniden ausgesetzt und viele Staustufen mit Fischleitern ausgerüstet, um sie für Wanderfische passierbar zu machen. Die aufwändigste Aufstiegshilfe bei Iffezheim, die im Juni 2000 in Betrieb ging, hat schon mehr als 15 Millionen Mark gekostet. Mit einem Hydromodell optimiert, sorgt hier eine eigens installierte Turbine für eine ständige Strömung, um die Tiere zum Einlass zu locken. Schon im ersten halben Jahr kämpften sich 81 Lachse, 330 Meerforellen, 540 Nasen sowie tausende Brachsen und Barben die 300 Meter lange Betonrinne hinauf.

Insgesamt sind bis Ende 2000 etwa 600 laichreife Lachse von ihrer mehrjährigen Atlantik-Reise in den Rhein zurückgekehrt. Das ist zwar ein erfreuliches Ergebnis, reicht aber für eine sich selbst erhaltende Population noch nicht aus. Die Sanierung des Rheins ist noch nicht abgeschlossen. Während die großen Abwassereinleitungen, die ehemals schlimmsten Verschmutzer, weitgehend entschärft sind, tritt ein anderes Problem in den Vordergrund: die diffusen Schadstoffeinträge. Auf unzähligen Schleichwegen gelangen die Gifte in den Rhein: Regen wäscht sie aus der Atmosphäre, die Strömung spült sie aus der Flusssohle und bei jedem Platzregen strömen sie aus Drainagen, Regenüberläufen und Trennkanälen.

Nach einer Bilanz der Schadstoffeinträge, von der IKSR vorgelegt, stammen inzwischen fast alle Pflanzenschutzmittel und mehr als die Hälfte der Schwermetalle, die im Fluss nachgewiesen werden, aus diffusen Quellen. Die „punktuellen Einleitungen" von Schadstoffen gingen dagegen zwischen 1985 und 1996 geradezu sensationell zurück: Chrom zum Beispiel um 95 Prozent von 600 auf 32 Tonnen, Zink um 72 Prozent, Blei um 80, PCB um 99 und Phosphor um 69 Prozent. Professor Wolfgang Kühn, Geschäftsführer des für die Rheinwasserwerke zuständigen „Technologiezentrums Wasser" in Karlsruhe, bringt den Wandel auf den Punkt: „Früher war die Produktion das Problem, jetzt sind es die Produkte."

Das Rheinwasser genügt denn auch – trotz aller Erfolge – noch immer nicht dem Qualitätsmaßstab, den sich die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins selbst gesetzt hat. Von 76 Einzelstoffen, die derzeit regelmäßig kontrolliert werden, übersteigen sieben die gültigen Grenzwerte: die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Kupfer und Zink, das Insektizid Lindan, das Herbizid Diuron sowie polychlorierte Biphenyle (PCB). Das Fluss- in hochwertiges Trinkwasser zu verwandeln, erfordert noch immer erheblichen Aufwand.

Einige Wasserwerke – vor allem in der Schweiz, den Niederlanden und im Wiesbadener Raum – nehmen diese Mühe auf sich. Sie speisen ihre Anlagen nicht mit Uferfiltrat, sondern entnehmen das Wasser direkt aus dem Fluss. Das Nass muss einen Marathon absolvieren, ehe es in die Trinkwasserleitungen eingespeist werden kann: Im Sandfang und im Sedimentierbecken verliert es zunächst seinen gröbsten Dreck, beim Stürzen über eine Treppe bekommt es eine belebende Sauerstoffinfusion, und Chemikalien trimmen es auf einen neutralen pH-Wert. Flockungsmittel binden Schadstoffe, und Aktivkohle, die Wunderwaffe

der Wasserwerker, macht störende Geruchs- und Geschmacksstoffe, Kohlenwasserstoffe und selbst Pestizide unschädlich. Anschließend wird das Wasser ins Erdreich gepumpt, das als nachgeschaltete, natürliche Kläranlage fungiert. Wenn es nach mehreren Wochen, mit Grundwasser angereichert, wieder ans Tageslicht kommt, durchläuft es abermals eine Aufbereitungstour. Erst danach genügt es der Trinkwassernorm.

Doch selbst diese aufwändige Prozedur entfernt nicht alle Schadstoffe. Den Wasserwerken machen derzeit vor allem Arzneimittel zu schaffen. „Endokrin wirksame Substanzen sind das Problem der Zukunft“, warnt der WWF-Experte Dister. Hormone, Antibiotika, Mittel gegen Kopfschmerzen oder übermäßiges Blutfett, auf Rezept verschrieben, machen sich mehr und mehr im Oberflächenwasser breit. Denn ein Teil der Wirkstoffe passiert den Körper unverändert und gelangt mit den Ausscheidungen ins Abwasser und in die Flüsse. Obendrein werfen viele Menschen unzählige Pillen einfach in die Toilette. Die biologisch hochwirksame Fracht hat bei Fischen schon zu Geschlechtsumwandlungen geführt. Menschen scheinen aus heutiger Sicht nicht unter ihr zu leiden, Meldungen über geringere Fruchtbarkeit konnten nicht bestätigt werden. Im Trinkwasser sind die Dosierungen zu gering für einen therapeutischen Effekt. ■

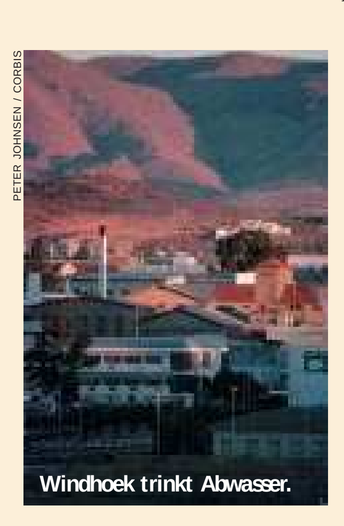
Klaus Jacob *ist Diplom-Bauingenieur und Wissenschaftsjournalist in Stuttgart.*

TECHNOGRAMM

ABWASSER

Aus alt mach frisch

In Windhoek, der Hauptstadt Namibias, waren Ende der 1960er Jahre die meisten unterirdischen Grundwasservorräte erschöpft, die Stauseen der nur zeitweise Wasser führenden Flüsse trocken gefallen. Die Stadtverwaltung beschloss daraufhin, Haushaltsabwässer zu Trinkwasser aufzuarbeiten. Die im Jahr 1968 gebaute erste Wiederaufarbeitungsanlage produzierte anfangs ungefähr 1740 Millionen Liter Trinkwasser im Jahr. Heute liefert sie doppelt so viel und deckt damit ein Viertel des jährlichen Bedarfs der Stadt; eine zur Zeit im Bau befindliche Anlage soll diesen Anteil verdoppeln. Zwar weigern sich die Einwohner, das gereinigte Wasser zu trinken und nutzen es überwiegend zur Bewässerung von Parks und Gärten. Doch wenn die Süßwasserreserven im Sommer oder während Dürreperioden allzu stark beansprucht werden, mischt die Stadt das geklärte Abwasser dem Leitungswasser bei, während der Dürreperiode von 1995 zum Beispiel zu 30 Prozent.



PETER JOHNSEN / CORBIS

Windhoek trinkt Abwasser.

WASSERMANAGEMENT

Sparen zahlt sich aus

Noch Anfang der 1990er Jahre kämpfte die Stadt New York gegen Wassermangel. Der Zuzug neuer Bewohner und trockene Jahre erforderte es, pro Tag zusätzlich 340 Millionen Liter Wasser zu erschließen – ein Plus von sieben Prozent. Statt eine Milliarde Dollar in eine neue Pumpstation am Hudson River zu investieren, förderte die Stadt bis 1997 die Anschaffung Wasser sparender Toiletten, was letztlich billiger war. Dazu kamen Wasseruhren, Reparaturen undichter Leitungen und kostenlose Wasser sparende Perlatoren. Auch die Feuer-Hydranten wurden bedacht: Magnetverschlüsse verhindern, dass sie von jedermann angestellt werden können. Alles in allem sank der Pro-Kopf-Verbrauch zwischen 1991 und 1999 von 737 auf 639 Liter Wasser pro Tag.

ENTSALZUNG

Meer-Wasser

Etwa 97 Prozent des Wassers der Erde ist zu salzig, um es zu trinken oder Pflanzen damit zu bewässern. In küstennahen Trockengebieten des Nahen Ostens, der Karibik und der Mittelmeerregion arbeiten deshalb Entsalzungsanlagen. Die Technik dazu ist Jahrhunderte alt: Meerwasser wird erhitzt, der aufsteigende Wasserdampf abgekühlt und das Kondensat aufgefangen; Salze und Schwebstoffe bleiben zurück. Modernere Anlagen gewinnen die Wärme zurück, arbeiten somit billiger. Eine preiswertere Alternative ist die Umkehr-Osmose: Dabei wird das Salzwasser durch eine Membran gedrückt, deren Poren so fein sind, dass Wassermoleküle, aber keine Salz-Ionen hindurch passen. Neuere Membranen aus Polyamid sind haltbarer und gegen Verunreinigungen im Wasser relativ unempfindlich.



WINTER / DPA

Weltweit stammt ein Prozent des Trinkwassers aus Entsalzungsanlagen.

Bislang stammt weltweit höchstens ein Prozent des Trinkwassers aus einer der 12 500 Meerwasser-Entsalzungsanlagen. Mit steigenden Wasserpreisen wird diese Technik auch in gemäßigten Klimazonen interessant; sogar für die USA – eines der wasserreichsten Länder.



RAUCHWETTER / DPA

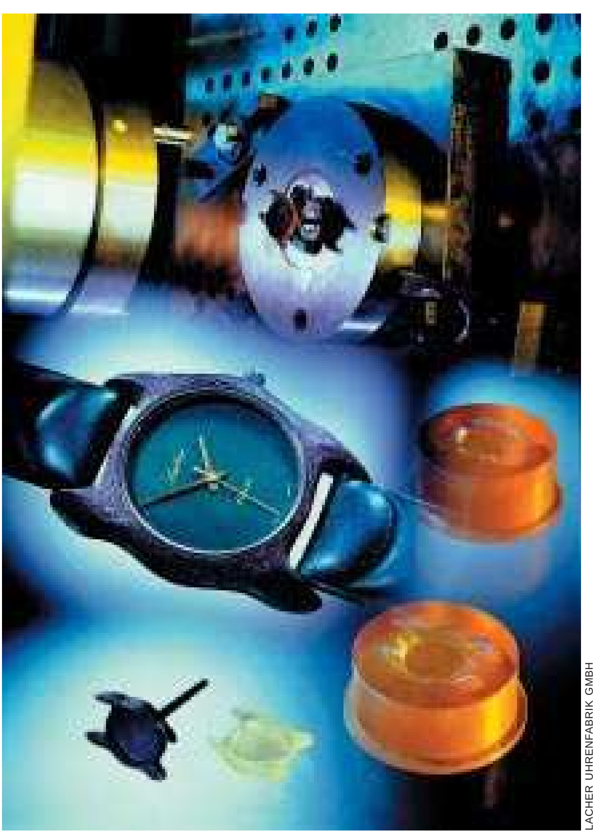
Manhatten spült sparsam.

Tecnaro

Spritzbares Holz: die Kunststoff-Alternative

Die Gründer der Eisenacher Tecnaro GmbH, Jürgen Pfitzer und Helmut Nägele, bringen Holz in jede gewünschte Form. Möglich macht dies ein von ihnen am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal bei Karlsruhe entwickelter thermoplastischer Werkstoff auf der Basis nachwachsender Rohstoffe. Ihr „Arboform“ (nach lateinisch *arbor*, Baum) besteht zu rund siebzig Prozent aus Naturfasern wie Flachs, Hanf, Sisal oder Baumwolle. Den großen Rest stellt Lignin, nach der Zellulose das häufigste natürliche Polymer; im Baumstamm dient es als Gerüstsubstanz für die Zellulosefasern. Pro Jahr fallen weltweit etwa fünfzig Millionen Tonnen davon als Abfallprodukt der Zellstoffindustrie an und werden gemeinhin verbrannt. Doch dafür ist es zu schade, wie Wissenschaftler im In- und Ausland erkannt haben (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 90): Lignin eignet sich als Matrix für umweltfreundliche Faserverbundwerkstoffe.

Der am ICT entwickelte Werkstoff verfügt über ähnliche mechanische und thermische Eigenschaften wie natürlich gewachsenes Holz, besitzt aber gleichzeitig die eines thermoplastischen Kunststoffs: Beim Erhitzen wird Arboform weich. Das gelieferte Lignin wird in mehreren Prozessschritten aufbereitet, getrocknet und anschließend mit zerkleinerten Naturfasern und „geheimen“ Additiven zu einem Granulat verarbeitet. Auf herkömmlichen Spritzgussmaschinen lässt dieses sich wie ein petrochemisch hergestellter Thermoplast – beispielsweise Polyethylen oder Polypropylen – zu Formteilen, Profilen oder Platten verarbeiten: Bei einer Temperatur von 110 bis 170 Grad Celsius und einem Druck von 1000 Bar wird es flüssig und kann anschließend innerhalb weniger Sekunden in ein Formwerkzeug gespritzt werden (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2001, S. 88). Auf diese Weise fertigt das Unternehmen serienmäßig beispielsweise holzfarbene Armbanduhrengehäuse im Auftrag der Pforzheimer Lacher Uhrenfabrik. Auch bunte Formteile sind möglich. Dazu werden vor dem Vergießen synthetische Farben oder Naturfarben aus Blaukraut, Roter Bete, Safran oder Paprika zugegeben.



LACHER UHRENFABRIK GMBH

Uhrengehäuse entstehen mit der Spritzgussmaschine (oben das Formwerkzeug).

Aus Pflanzen hergestellte Kunststoffe verbrauchen in der Gesamtökobilanz bei ihrer Gewinnung oft mehr Erdöl als herkömmliche Kunststoffe. Die Firmengründer sind deshalb sehr stolz auf das anders lautende Ergebnis einer Studie des Instituts für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart: Arboform verbraucht bei seiner Herstellung vergleichsweise wenig Energie, ist biologisch abbaubar und – bei der Verbrennung wird nur so viel Kohlendioxid frei, wie die Pflanze zuvor beim Wachstum aufgenommen hat. Erfreulich: „Trotz“ seiner ökologischen Vorteile kostet Arboform – auf eine spezielle Anwendung bezogen – nicht mehr als ein herkömmlicher Kunststoff.

Der Holzwerkstoff soll nicht nur für den Spritzguss typische Kunststoffe wie Polyamid oder Polykarbonat verdrängen, sondern auch Schichtpressholz. In der Baubranche beispielsweise besteht die Unterkonstruktion von Parkettböden aus diesem Werkstoff, der oftmals mit giftigen Leimen wie Phenolharz gebunden wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich



TECNARO

Holz als Spritzgussgranulat – ökologisch und ökonomisch

Das Unternehmen im Profil

Die Tecnaro GmbH wurde im Juli 1998 aus dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal bei Karlsruhe ausgegründet. Im Mai 2000 verlegten die beiden Gründungsmitglieder Helmut Nägele und Jürgen Pfitzer den Standort nach Eisenach (Thüringen), um staatliche Förderprogramme für die neuen Bundesländer in Anspruch nehmen zu können. Die beiden beschäftigen acht Angestellte und drei Diplomanden. Noch heute arbeitet Tecnaro eng mit dem Fraunhofer ICT zusammen. Die derzeitige Produktionskapazität beträgt jährlich rund 300 Tonnen Arboform-Granulat. Da Arboform in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt werden kann, ist zu erwarten, dass die produzierte Jahresmenge rasch steigen wird.

ein nicht sauber verlegter Boden verziehen kann. Arboform hingegen muss nicht geleimt werden, ist in alle Raumrichtungen gleichermaßen belastbar, nimmt kaum Feuchtigkeit auf und bleibt formstabil.

Vorteile nicht nur in der Baubranche: Im Automobil-Innenraum soll der umweltverträgliche Werkstoff künftig mit Edelholz furniert werden, denn herkömmliche Kunststoff-Träger dehnen sich bei Temperaturen von minus 30 bis plus 90 Grad Celsius zehnmal stärker aus als Holz, was Risse verursachen oder die Edelholzfurniere absprengen kann; Probleme, die bei einem Arboform-Träger mit Holzcharakter nicht auftreten.

Eine viel versprechende Branche ist auch die Musikindustrie. Nach wie vor gelten Holzinstrumente als qualitativ wertvoll. Da sich Arboform präziser als der Naturstoff verarbeiten lässt, noch dazu in Großserie, erhält man vergleichsweise kostengünstige Instrumente mit



FHG ICT, PFINZTAL

Die Unternehmensgründer Helmut Nägele (links) und Jürgen Pfitzer lassen Holzgranulat rieseln.

einer angenehmen Holzakustik, wobei gleich konstruierte Instrumente identisch klingen sollten.

Ein weiterer Markt für den ökologischen Werkstoff sind Spielwaren. Vor kurzem hat die Landesgewerbeanstalt Bayern Babyspielzeug aus Arboform untersucht und herausgefunden, dass die Werte gefährlicher Substanzen unterhalb der Nachweisgrenze liegen, da auf giftige Leime verzichtet wurde.

*Beitrag von **Ulrike Zechbauer**. Die Autorin arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in München.*

*Links zu den Unternehmen finden Sie bei **www.spektrum.de** unter „Aktuelles Heft“.*

WISSENSCHAFT UND ÖFFENTLICHKEIT

Wissenschaftskommunikation: Woran scheitert sie?

Der Konstanzer Wissenschaftsphilosoph Jürgen Mittelstraß nimmt Stellung zu dem schwierigen Umgang der modernen Gesellschaft mit der Wissenschaft.

Von Jürgen Mittelstraß

Wenn es um das Verhältnis von Wissenschaft und Öffentlichkeit, von Wissenschaft und Gesellschaft geht, schrillen derzeit allerorten die Alarmglocken. Die Wissenschaft – gewohnt, mit dem absoluten Geist im Rücken im Namen der Wahrheit und eines allem überlegenen Wissens zu sprechen – trifft auf eine Welt, die sich in Sachen Wissenschaft ihre eigenen Gedanken zu machen beginnt. Die Gesellschaft fordert einerseits Nützlichkeit, auch und gerade im Ökonomischen, und andererseits neigt sie mehr und mehr dazu, die Wissenschaft für Risiken und unerwünschte Entwicklungen verantwortlich zu machen, die heute ihren Alltag bestimmen. Nicht alles, was die Forschung tut, ist mehr willkommen, und nicht alles, was die Forschung will, wird mehr akzeptiert. Auf einmal, so scheint es, ist aus dem Wunderkabinett der Wissenschaft die Büchse der Pandora geworden.

Doch ist das Verhältnis wirklich so schlecht? Gibt es einen Akzeptanzverlust (wenn es um die früher als Segnungen bezeichneten Früchte der Wissenschaft geht), eine Wissenschaftsfeindlichkeit (meist im Verbund mit Technikfeindlichkeit) und eine Verantwortungskrise (auf das moralische Fundament auch des wissenschaftlichen Handelns bezogen)? Braut sich da wirklich ein Waterloo der Wissenschaft zusammen aus einem Gemisch, das Dieter Simon, der Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, mit folgenden Schlagworten beschreibt:

- „Akzeptanzverweigerung gegenüber wissenschaftlichen Resultaten;
- Verständnislosigkeit gegenüber den Bedürfnissen der Wissenschaft;
- Zweifel an der Objektivität wissenschaftlicher Urteile;
- Angst vor der Unbeherrschbarkeit der Folgen wissenschaftlich-technischen Handelns;
- Verunsicherung durch Ethikdefizite in den Reihen der wissenschaftlichen Akteure;
- Mängel in der *culture scientifique, technologique et industrielle*, wie die Franzosen sagen;
- Verlust des Leitbilds der Wahrheit"?

Gleich vorweg: Ich halte das für sehr unwahrscheinlich und eher für das Resultat einer Weinerlichkeit in der Selbstanalyse der Wissenschaft und einer Freude der Medien an schlechten Nachrichten als für ein objektives Bild der Lage.

Umgekehrt teile ich auch die Vorstellung nicht, eine *scientific illiteracy*, wie die Verstehenslücke zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit gerne bezeichnet wird, lasse sich durch Programme im Sinne von *public understanding of science* wirklich schließen. Gewiss muss auf Seiten der Wissenschaft „das Bewusstsein dafür weiter gestärkt werden, dass die Information der Öffentlichkeit zur Legitimation wissenschaftlichen Tuns gehört, ja, dass aktives Werben um Vertrauen, Anerkennung und letztlich finanzielle Unterstützung zu den Aufgaben eines Wissenschaftlers gehören", wie das Ernst-Ludwig Winnacker, Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft, ausgedrückt hat. Aber führt ein solches Bewusstsein, das in der Tat zu den Selbstverständlichkeiten wissenschaftlicher Arbeit gehört, auch zu neuen Instrumenten, mit denen sich die genannte Lücke schließen lässt? Oder anders: Wie verständlich kann Wissenschaft überhaupt sein? Woran scheitert die Kommunikation über Wissenschaft wirklich?

Die Diskussion muss die Grenzen des Verstehens aufzeigen

Eines ist in diesem Zusammenhang jedenfalls klar: Popularisierung wäre zu wenig – hier würde im Grunde eine längst obsolet gewordene Vorstellung eines Dualismus von wahrheitsverwaltender Wissenschaft und dummem Volk weitergetragen. Andererseits wäre eine Transformation von *illiteracy* in *literacy*, von Unverstand in wirkliches Verstehen zu viel – hier müsste sich ja der wissenschaftliche Laie selbst in einen Wissenschaftler verwandeln. In diesem Sinne hat denn auch Dieter Simon den Initiatoren eines Aktionsprogramms namens PUSH (*public understanding of science and humanities*) – jetzt umgetauft in „Wissenschaft im Dialog" – empfohlen, sich aus der Falle zu befreien, „Wissenschaft popularisieren zu wollen", und sich zugleich von der Illusion zu verabschieden, „öffentlich verstanden zu werden". Aus dem – zu Recht oder zu Unrecht – ausgerufenen Notstand führt eben weder der eine Weg (Popularisierung) noch der andere (Verwissenschaftlichung des Verstehens) heraus.

Eher schon sollte die Aufklärung über diesen Notstand selbst weiterhelfen, also der Versuch, auf eine nüchterne und auch dem nicht-wissenschaftlichen Verstand zugängliche Weise aufzuzeigen, welche begrifflichen und konzeptionellen Unklarheiten es in der Diskussion über Wissenschaft gibt und wo die Grenzen des Verstehens liegen, die es zwangsläufig geben muss.

Hierzu möchte ich drei Thesen vorstellen:

These 1: Nicht Klarheiten, sondern Mythen bestimmen heute weitgehend das Verhältnis von Wissenschaft und Öffentlichkeit. Mit diesen Mythen biedert sich der halbgebildete Verstand beiden Seiten an und schürt dabei einen neuen Streit der Fakultäten, den er gerade zu überwinden vorgibt.

Auch in unserer durch Wissenschaft geprägten Welt gibt es Mythen. Zum Beispiel die Vorstellung, dass in der Wissenschaft alles empirisch sei. Oder neue Mythen der Vergänglichkeit und der künstlichen Intelligenz.

Betrachten wir als Erstes den Mythos der Vergänglichkeit. Oft ist davon die Rede, dass das, was wir eben noch zu wissen meinten, mit einer bestimmten „Halbwertszeit" verfällt. Diese Terminologie stammt aus den Lehrbüchern der Kerntechnik und des Strahlenschutzes. Es heißt, dass sich die Halbwertszeit des Wissens in rasanter Weise verringere – heute meint man in einem Zeitraum von etwa fünf Jahren. Das aber ist Unsinn. Was einmal erkannt oder entdeckt ist, was sich einmal als begründet und erwiesen, als den zu erkennenden Gegebenheiten entsprechend herausgestellt hat, verliert – Irrtumsmöglichkeiten selbstverständlich immer in Rechnung gestellt – nicht alle fünf Jahre seine Wahrheit. Das gilt von

mathematischen Einsichten ebenso wie vom Periodensystem der Elemente oder von unserem Wissen über Naturgesetze. Was hier offenbar gemeint ist, dann aber auch so ausgedrückt werden sollte: Unser Wissen vermehrt sich immer schneller, etwa alle fünf Jahre verdoppelt es sich.

Das ist zweifellos für sich selbst genommen schon ein großartiger Ausdruck erfolgreichen menschlichen Strebens nach Einsicht und Wissen. Allerdings will sehr genau beurteilt werden, um welches Wissen es sich da jeweils handelt. Wir zählen hier möglicherweise viel Überflüssiges und Unbedeutendes mit, was nur die Publikationslisten der Wissenschaftler verlängert. Nicht alles Rechnen hinter dem Komma macht Sinn. Nicht alles, was wir in Erfahrung bringen, weil es unsere Instrumente registrieren und erheben können, bringt uns in unserem Streben nach Einsicht und (relevantem) Wissen wirklich weiter. Neben dem unaufhaltsam wachsenden Informationsmüll gibt es auch eine Art Wissensmüll.

Auch der Mythos, die natürliche Intelligenz werde durch eine künstliche Intelligenz (KI) abgelöst, hält sich hartnäckig. Gefördert wird er von selbst ernannten Propheten, die auf die Fortschritte von Gen- und Informationstechnologie, Robotik und Hirnforschung verweisen. Unter ihnen sind viele vom Schlage eines Ray Kurzweil und Bill Joy, denen jüngst auch solche Journale, die sonst auf Nüchternheit und Unaufgeregtheit bedacht sind, mit wohligem Grusel ihre Spalten öffneten. Da siegt das unverdaute Zeug über jede Differenzierung, ein makabres Feuilleton über sachlich und wissenschaftlich informiertes Argumentieren.

Dabei zeugen wiedererweckte Erwartungen an eine künstliche Intelligenz von gewaltigen Missverständnissen – etwa dem, dass aus einer weiteren Zunahme von Rechengeschwindigkeiten ein qualitativer Umschlag in Intelligenz erfolge. Zudem wird ein dem Menschen vergleichbares System künstlicher Intelligenz – falls es wirklich Wege dorthin geben sollte – „nicht unterhalb des Komplexitätsgrades realisierbar sein, den die Großhirnrinde erreicht hat“, wie es der renommierte Hirnforscher Wolf Singer ausdrückte. Dabei sei „man heute noch nicht einmal in der Lage, Teile eines Fliegenhirns zu simulieren, geschweige denn die Leistungen einer ganzen Fliege“. Auch Singer wiederholt in diesem Zusammenhang die über 200 Jahre alte Frage Kants, ob sich das Bewusstsein, ob sich ein kognitives System überhaupt selbst vollständig beschreiben könne. Unsere Utopisten à la Kurzweil und Joy überspringen diese Frage einfach – mit nichts als ihren Fantasien (und gelegentlich starken wirtschaftlichen Interessen) in der Hand.

Doch auch ohne eine derartige, erkenntnistheoretisch subtile Frage bliebe ein mögliches KI-Land dürr. Versteht man auch nur ein wenig von einer Turing-Maschine – dem Grundmodell aller programmierbaren Rechner – und von deren konstruktiver Einfachheit, dann könnte einem angesichts der anspruchsvollen Argumentationen Kants, der kunstvollen Sonette Rilkes oder der scharfsinnigen Aphorismen Lichtenbergs und Nietzsches das Lachen kommen – wenn es einem nicht angesichts der Naivität, mit der nur allzu oft über die Vergleichbarkeit von Mensch und Maschine gesprochen wird, im Halse stecken bliebe. Das Ganze ist denn auch eher ein Medienereignis als eine Maßnahme zur Behebung der beklagten *illiteracy*.

These 2: Die wissenschaftspolitische Debatte wird heute maßgeblich durch einen gesellschaftlichen Disput um Risiko und Akzeptanz bestimmt. Dieser Disput ist meist unterscheidungsarm und ideologisch unterlegt, und er gefährdet, wenn die gesellschaftliche Urteilskraft mit den tatsächlichen Wissenschaftsleistungen und deren Nutzung nicht Schritt hält, die Grundlagen der modernen Welt.

Ein weiterer langlebiger Mythos ist die Vorstellung einer fehlenden Wissenschafts- und Technikakzeptanz. Dabei ist diese Akzeptanz – wie mittlerweile auch zahlreiche empirische Studien belegen – heute nicht geringer als früher, als die Wissenschaftswelt, aus heutiger Sicht betrachtet, noch in Ordnung schien. Der Unterschied ist nur, dass diese Akzeptanz heute nicht mehr unkritisch ist. Das aber sollte eigentlich zu den Stärken einer rationalen Gesellschaft gezählt werden, und nicht zu ihren Schwächen.

Worum geht es genauer? Zunächst zum Begriff des Risikos. Er nimmt heute in der unklaren und vielleicht gerade deswegen so beliebten Rede von einer „Risikogesellschaft“ geradezu universale Formen an. Es drängt sich der Eindruck auf, die moderne Gesellschaft habe sich, getrieben durch Wissenschaft und Technik, aus risikoarmen Räumen, die einmal ihr Zuhause waren, in einen durchgehenden Risikozustand drängen lassen und müsse diesen nun, um überleben zu können, wieder verlassen – gegebenenfalls auch auf Kosten von Wissenschaft und Forschung. Dieser Eindruck ist falsch. Tatsächlich ist das Leben, auch das gesellschaftliche, gegenüber früher nicht risikoreicher geworden. Nur die Formen der Risiken haben sich im Zuge der Entwicklung technischer Kulturen verändert. Außerdem ist der Begriff des Risikos selbst durch zahlreiche Unklarheiten belastet, die meist durch mangelnde Unterscheidungen hervorgerufen werden.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, zwischen „gewählten“ und „gegebenen“ Risiken zu unterscheiden. Zu Ersteren gehören die Risiken, die man freiwillig eingeht, wie etwa beim Skilaufen oder beim Fliegen. In der Regel wird das Eingehen eines solchen Risikos akzeptiert. Das Leben unter einem gegebenen Risiko hingegen – zum Beispiel im Hinblick auf Erdbeben oder „normale“ Krankheiten – wird nicht akzeptiert, und zwar unter der illusionären Annahme, solche gegebenen Risiken ließen sich durch geeignetes gesellschaftliches Handeln beziehungsweise Nicht-Handeln vermeiden. Hierhin gehören auch Handlungen unter Risiko, das heißt Handlungen, bei denen neben der Realisierung des intendierten Zwecks auch – mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit – unerwünschte Folgen entstehen können.

Zu diesem zweiten Typ Risiko gehört in der öffentlichen Wahrnehmung auch das Forschungshandeln. So werden die Zwecke moderner Forschung wie etwa in ▶

(Seiten 84, 85 und 86: Anzeige und Beihefter)

der Gentechnik und der Reproduktionsmedizin akzeptiert (zumindest zu großen Teilen), die möglichen unerwünschten Folgen hingegen nicht. Diese Nicht-Akzeptanz geht bisweilen bis hin zu der Empfehlung, auf die (positiven) Zwecke ganz zu verzichten, um mögliche (negative) Folgen zu vermeiden. Verstärkt wird diese Haltung, die zunächst einmal etwas über die Ängstlichkeitslagen und die Chancenfreudigkeit einer Gesellschaft aussagt, durch ein Prinzip, das man nach dem von Hans Jonas formulierten Verantwortungsbegriff das „Jonas-Prinzip" nennen könnte: die Aufforderung nämlich, alles zu unterlassen, was möglicherweise Gefahren birgt.

Tatsächlich führt die Verfolgung eines derartigen Prinzips zu einer Ungleichverteilung von Risiken und Chancen – und schließlich auch dazu, dass die Risiken nicht etwa sinken, sondern sogar steigen, weil nämlich durch fehlende Forschung und Entwicklung zum Beispiel die Fähigkeit verloren geht, auf die Herausforderungen und Gefahren der andauernden natürlichen Evolution zu reagieren. Dies müsste in der öffentlichen Debatte, vor allem von Seiten der Wissenschaft selbst, sehr viel deutlicher gemacht werden als bisher.

Verbunden mit dem Begriff des Risikos ist in der öffentlichen Diskussion der Begriff der Akzeptanz. Die Befolgung eines Jonas-Prinzips – beziehungsweise eine Situationswahrnehmung, deren Ausdruck ein solches Prinzip ist – führt zu sinkender Akzeptanz von Forschung und

Ein gesellschaftlicher Streit um die Folgen der Wissenschaft ist notwendig

Technologie. Nun ist zwar ein derartiges Schwinden der Akzeptanz tatsächlich feststellbar, doch wird dieser Umstand eben erheblich übertrieben. Hier ist es angebracht, sich folgende Schlichtheiten wieder ins Gedächtnis zu rufen.

Dass wissenschaftliche und technische Entwicklungen, die gravierend in das gesellschaftliche und individuelle Leben eingreifen, auf ein kritisches Bewusstsein stoßen, ist nicht krisenhaft, sondern normal. Gäbe es ein derartiges Bewusstsein nicht, müsste sich gerade die moderne Gesellschaft, die in ihrer dynamischen Entwicklung auf Wissenschaft und technischen Fortschritt setzt, vorwerfen lassen, in Dingen, die ihr eigenes Wesen und ihre eigene Rationalität betreffen, naiv zu sein. Sie nähme ihre eigene Entwicklung wie einen sich entwickelnden Naturzustand wahr. So betrachtet ist denn auch ein (gesellschaftlicher) Streit um Resultate und Folgen der Wissenschaft nicht unnötig oder gar von vornherein ideologisch, sondern notwendig. Allerdings sollte dieser Streit mit den Stärken einer rationalen Kultur, nämlich mit Verstand und Vernunft, geführt werden und nicht gegen sie. Wo er gegen Verstand und Vernunft geführt wird, verlässt er die Grenzen einer rationalen Kultur und wird irrational. Hier liegen also tatsächlich wesentliche Aufklärungsaufgaben im Verhältnis zwischen Wissenschaft und Gesellschaft.

Wie irrational dieser Streit im Übrigen gelegentlich geführt wird, lässt sich am Beispiel Chemie verdeutlichen. Nahrungsmittel, die chemisch oder gentechnisch behandelt sind, gelten oft ohne Ansehen der Umstände als gefährlich, während solche, die ohne Chemie und Gentechnik gezogen und geerntet wurden, als gesund – weil rein natürlich – angesehen werden. Dabei ist bekannt, dass Getreide, das in Berührung mit der Agrarchemie geraten ist, meist keinerlei chemische Rückstände – etwa von Pflanzenschutzmitteln – aufweist, während im anderen, im „ökologischen" Falle beispielsweise gefährliche Mutterkorn-Alkaloide oder Schimmelpilz-Aflatoxine auftreten können. Das Gleiche ist bei gentechnisch veränderten Organismen der Fall, mit denen bestimmte Risiken – zum Beispiel im Allergiebereich – nicht etwa erhöht, sondern gesenkt werden. Natur, so die verbreitete Parole, sei eben immer gesund, wenn man sie nur in Ruhe lässt; Chemie hingegen sei immer gesundheitsgefährdend. Übersehen wird dabei, dass natürliche Stoffe durchaus wesentlich gefährlicher sein können als industrielle Chemikalien oder gentechnisch behandelte Substanzen.

Im Übrigen ist die Rede von Akzeptanz in der Regel ebenso unterscheidungsarm wie die Rede vom Risiko oder von einer Risikogesellschaft. Das macht vor allem die in diesem Zusammenhang notwendige, meist aber eben unterbleibende Unterscheidung zwischen Akzeptanz (einem empirischen Kriterium) und Akzeptabilität (einem normativen Kriterium) deutlich. Gemeint ist die Unterscheidung zwischen dem, was faktisch akzeptiert wird, und dem, was akzeptiert und dann auch zugemutet werden sollte. Wo diese Unterscheidung nicht getroffen wird, beziehungsweise wo das eine (Akzeptanz als empirisches Kriterium) an die Stelle des anderen (Akzeptabilität als normatives Kriterium) tritt, wird ▶

Große Magnete

Wunderwaffe für wenige

Die Kernmagnetische Resonanz (NMR) ist neben der Kristallstrukturanalyse das wichtigste Werkzeug der Strukturbiologen zur Aufklärung von Molekülstrukturen. Bisher haben sich NMR-Methoden vor allem für kleine Proteine als nützlich erwiesen. Um in den Größenbereich vorzustoßen, in dem es noch wichtige Fragen zu beantworten gibt, benötigt man allerdings Magnete, die größer, stärker und teurer sind als alle heute verfügbaren. Theoretisch werden die optimalen Bedingungen bei einer Protonenfrequenz von 1000 Megahertz erreicht.

Die meisten biologisch orientierten NMR-Labors besitzen 500- und 600-Megahertz-Geräte. Einige wenige haben ein 750- oder 800-Megahertz-Spektrometer. Jetzt steht die nächste Generation vor der Tür. Seit dem vergangenen Sommer ist bei der Firma Oxford Instruments ein Prototyp mit 900 Megahertz in Betrieb.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat 20 Millionen Mark für zwei dieser Geräte bereitgestellt, die an der TU München und an der Universität Frankfurt betrieben werden sollen. Ein drittes wird möglicherweise in Göttingen platziert werden.

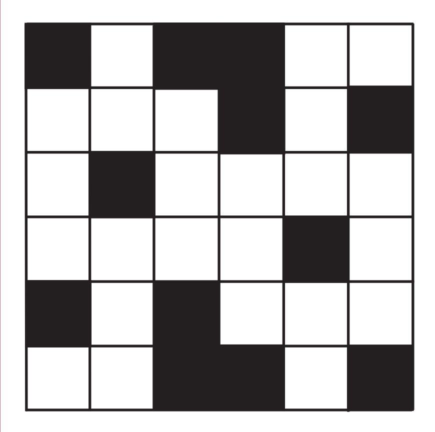
Experten sind sich einig, dass das „900er" bereits nahe genug an dem magischen Wert von 1 Gigahertz liegt, um spürbare Verbesserungen in der Zugänglichkeit größerer Proteine zu erreichen. Dennoch wird diese „Wunderwaffe", vor allem wegen der astronomisch hohen Kosten des Magneten und des dafür erforderlichen Spezialgebäudes, möglicherweise ein Werkzeug bleiben, das nur ganz wenigen Wissenschaftlern zur Verfügung steht. Auf absehbare Zeit wird es weltweit weniger als zwanzig solcher Instrumente geben: etwa ein halbes Dutzend in den USA, vier in Japan, drei in Deutschland, zwei in Großbritannien, eins in Schweden.

Während bisher praktisch jeder NMR-Nutzer ohne große Probleme Zugang zu einem der gängigen 500- und 600-Megahertz-Geräte gewinnen konnte, bedeutet der Trend zu einer geringeren Zahl von teureren Spitzeninstrumenten zwangsläufig eine Zentralisierung. Wer künftig mit den besten Strukturforschern um die Titelblätter von „Nature", „Science" und „Cell" konkurrieren will, wird zuallererst um den Zugang zu den magischen Magneten konkurrieren müssen. Ein Auswahlverfahren auf Peer-Review-Basis, wie es etwa bei den Elektronensynchrotronen bereits üblich ist, könnte möglicherweise auch in diesem Bereich zur Notwendigkeit werden.

Michael Groß

Kreuzzahlrätsel

von Pierre Tougne



Dieses Rätsel stammt ursprünglich von Nobuyuki Yoshighara.

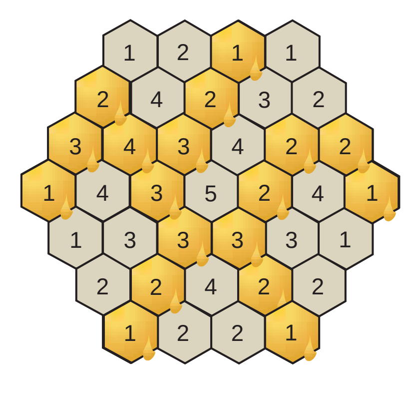
In die weißen Felder sollen Ziffern zwischen null und neun eingetragen werden, sodass sich von links nach rechts und von oben nach unten gelesen Quadratzahlen ergeben.

Wie bei einem Kreuzworträtsel haben „Wörter“, die nur aus einem „Buchstaben“ bestehen, keine Bedeutung: Auf einstellige Zahlen kommt es nicht an. Alle Quadratzahlen sind verschieden und beginnen nicht mit null.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Ampli-Tuner (Radios mit Verstärker) R-811 RDS von Onkyo. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 14. August 2001, eingehen.

Lösung zu „Honigwaben“ (Juni 2001)



Die Wabe links hat die Bienenkönigin nach dem Verfahren *A* codiert, bei dem jede Kammer mit der Anzahl der sie umgebenden gefüllten Kammern beschriftet ist.

Bei der Wabe rechts wurde die Codierung *B* verwendet, bei der die Kammer selbst mitzählt, wenn sie Honig enthält.

Vermutlich kommt man am schnellsten durch einfaches Ausprobieren auf die richtige Lösung. Man beginnt an einer Ecke und versucht nach einer der beiden Codierungen die Kammern zu füllen, ohne dabei einen Widerspruch zu erzeugen.

Man kann das Problem auch auf streng formalem Wege lösen: Die Füllung jeder Kammer ist eine Unbekannte, und aus den vorhandenen Informationen ergibt sich ein lineares Gleichungssystem mit 37 Gleichungen und 37 Unbekannten, das mit einem Computerprogramm rasch, von Hand jedoch nur mühsam zu lösen ist.

Die Gewinner der sechs Uhrenbausätze „Clock-Kit“ sind Hans Henning Petras, Braunschweig; Ramona Loeschcke, Kassel; Friederun Martz, Ulm; Lothar Schwarz, Berlin; Kristina Mauthe, Edemissen; und Werner Kraus, Frankfurt am Main.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal Wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

nicht nur die Bedeutung der Rede von Akzeptanz unklar, es wird auch zwischen dem Vernünftigen und damit Zumutbaren auf der einen und dem Unvernünftigen auf der anderen Seite nicht mehr unterschieden.

Das bedeutet natürlich nicht, dass schwindende Akzeptanz allein Ausdruck gesellschaftlicher Dummheit ist. Sie ist vielmehr Indiz dafür, dass mit dem gesellschaftlichen Diskurs über Wissenschaft etwas nicht stimmt. Mit anderen Worten: Akzeptanzkrisen sind in rationalen Kulturen normal, wenn sie Elemente einer Akzeptabilitätskrise aufweisen. In diesem Sinne sind Wissenschafts- und Technikkritik der rationale Stachel im Fleisch einer modernen Gesellschaft. Sie erinnern diese daran, dass nicht nur Irrationalismus und Fundamentalismus ihre Feinde sind, sondern auch Urteilsschwäche und argumentative Armut.

These 3: Wo sich Wissenschaft und Gesellschaft in den Haaren liegen und sie manchmal nicht wissen warum, hilft nur Aufklärung über das weiter, was Wissenschaft zu leisten vermag und was nicht, desgleichen Gelassenheit im Umgang mit dem Verständlichen und dem Unverständlichen. Dass Wissenschaft Teil einer gemeinsamen (gesellschaftlichen) Praxis ist, bedeutet nicht Unterwerfung unter diese Praxis, sondern deren zukunftsoffene Erweiterung.

Der Schleier des Unverständnisses, der heute nach Meinung vieler über dem Verhältnis zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, zwischen Wissenschaft und Gesellschaft liegt und die Kommunikation über Wissenschaft häufig scheitern lässt, dürfte sich leichter lüften lassen, wenn wenigstens Klarheit über das Verständliche und das Unverständliche sowie über die Wege herrschte, die zwischen beiden gangbar sind. Die Frage ist: Wie verständlich ist, wie verständlich kann, wie verständlich soll Wissenschaft sein?

Trotz aller Erfolge der derzeitigen intensiven Bemühungen, Wissenschaft verständlich zu machen, kommt man nicht um die Tatsache herum, dass sich wissenschaftliches Verständnis nicht überall herstellen lässt. Schwierige oder komplexe Sachverhalte lassen sich eben nicht beliebig vereinfachen. Fachterminologien, ohne die die Wissenschaft ihre Exaktheit und ihre „Sprache“ verlöre, können nicht in allen Teilen in umgangssprachliche Formen und Verständlichkeiten transformiert werden. Wer dennoch anderer Meinung ist, muss zwangsläufig mit Enttäuschungen leben.

Es ist unvermeidlich, dass die Wissenschaft in einem gewissen Sinne unverständlich ist. Wissenschaft befasst sich

mit Dingen, die dem nicht-wissenschaftlichen Verstand nicht in gleicher Weise zugänglich sind wie dem wissenschaftlichen Verstand, jedenfalls nicht ohne lange Ausbildungswege. Und Wissenschaft spricht in einer Sprache, die zunächst einmal nur sie selbst versteht. Beides gehört zu ihrem Wesen, und beides hat auch etwas mit ihrer Aufgabe zu tun. Noch pointierter ausgedrückt: Wissenschaft, verständlich gemacht, verliert ihre Wissenschaftlichkeit – und zu diesem „Opfer“ sind nur wenige Wissenschaftler bereit, selbst wenn es nur darum geht, die eigenen Forschungsergebnisse allgemein darzustellen.

An den Wegen einer Wissenschaft, die sich verständlich zu machen sucht, lauern zudem viele Missgünstige und Verständlichkeitsfeinde, darunter auch viele Wissenschaftler selbst. Sie nutzen die Möglichkeit, unter dem Deckmantel des Wissenschaftlichen Dinge unnötig zu komplizieren. Das betrifft nicht nur die Sprache, sondern auch die Theorien, mit denen sich die Wissenschaft darstellt. Manche Theorien kommen wie des Kaisers neue Kleider daher, vor allem in den Geistes- und Sozialwissenschaften, die sich immer wieder einem besonderen Legitimationsdruck ausgesetzt sehen. Da liegt dann die Flucht in den terminologischen Schwulst und die Verklausulierungssucht nahe; das Einfache (auch in der Sprache) erscheint als der Feind der eigenen Bedeutungsvermutung. Das aber heißt: Der Ausweis der Wissenschaftlichkeit erfolgt hier durch den (rettenden) Nachweis der Unverständlichkeit. Man spricht eben die Sprache des absoluten Geistes, der sich nur den Eingeweihten offenbart, zu denen man natürlich gehören möchte.

Leider ist dieser Fall keineswegs selten. Dass man sich in dieser Weise versteht, stört die Bemühung des wissenschaftlichen und des nicht-wissenschaftlichen Verstandes erheblich, sich in einer gemeinsamen, verständlichen Welt einzurichten. Deshalb ist aber auch Wissenschaftskritik – wissenschaftlich informiert und mit Augenmaß betrieben – angesichts der weitgehenden „Sprachlosigkeit“ zwischen Wissenschaft und Gesellschaft eine ebenso wichtige Aufgabe wie die Bemühung des Alltagsverstandes, sich in der Welt des wissenschaftlichen Verstandes umzusehen.

Wissenschaft ist also längst nicht mehr der reine Hort der Wahrheit und des gesellschaftlichen Glücks. Aber sie ist die Zukunft der modernen Gesellschaft, ob diese es will oder nicht. Deshalb plädiere ich für Selbstaufklärung der Wissenschaft. Eine Aufklärung der Wissenschaft durch die Gesellschaft würde auf andere Rationalitäten setzen und in der Regel einem undurchschauten Paradigmenwechsel unterliegen. Weil der nicht-wissenschaftliche Verstand in vielerlei Hinsicht den wissenschaftlichen Verstand nicht versteht, erkennt er auch nicht, wo dessen Stärken und wo dessen Schwächen liegen.

Das bedeutet indes nicht, dass eine Kooperation des wissenschaftlichen und des nicht-wissenschaftlichen Verstandes unter einer Aufklärungsperspektive keine Vorteile bieten würde. Jeder Schritt, der die andere Seite zum Nachdenken zwingt, ist sinnvoll. Man darf nur nicht zu viel verlangen und zu viel versprechen. Eben dazu tendieren heute sowohl der wissenschaftliche als auch der nicht-wissenschaftliche Verstand. Auch deshalb sollte auf beiden Seiten mehr Gelassenheit herrschen. Die Verhältnisse zwischen dem wissenschaftlichen und dem nicht-wissenschaftlichen Verstand bleiben, wenn es um die kritische Orientierung des einen durch den anderen geht, asymmetrisch. Das mag vielen missfallen, ist aber der Preis des wissenschaftlichen Wesens der modernen Gesellschaft. ■

Jürgen Mittelstraß *ist Professor für Philosophie und Wissenschaftstheorie an der Universität Konstanz.*

„AUSGEZEICHNET“

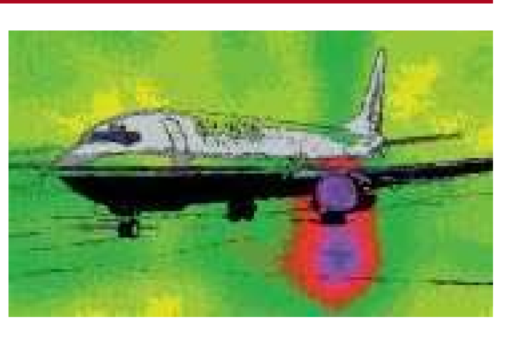
OTTO VON GUERICKE-PREIS

Mit Mikrofonen sehen

Die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) vergibt den diesjährigen mit 10000 Mark dotierten Otto von Guericke–Preis an Gerhard Heinz von der in Berlin ansässigen Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik. Die AiF würdigt mit ihrer Auszeichnung herausragende Leistungen auf dem Gebiet der industriellen Gemeinschaftsforschung kleiner und mittlerer Unternehmen. Gerhard Heinz wird für seine Entwicklung der „akustischen Kamera“ geehrt, mit welcher er die Lärmemission von Maschinen anschaulich darstellen kann.

Rauschende Rotorblätter

Das System scheint denkbar einfach: Eine Videokamera filmt die Schallquelle, während gleichzeitig mehrere Mikrofone die emittierten Schallwellen registrieren. Ein Computer stellt anschließend die akustischen Informationen in Falschfarben dar und legt sie über das Videobild. Das so erstellte optische Bild ermöglicht die Ortung von unliebsamen Frequenzen und liefert Hinweise für allfällige Konstruktionsverbesserungen. Gegenüber den herkömmlichen Messverfahren hat die akustische Kamera erhebliche Vorteile. Diese liegen in erster Linie in der Anschaulichkeit der akustischen Abstrahlungsvorgänge. Zusätzlich lässt sich die Dynamik von Lärmemissionen analysieren – die akustische Kamera schießt bis zu 100000 optische Bilder pro Sekunde.



Triebwerkslärm einer Boeing

Die Industrie hat den Nutzen des neuen Messverfahrens offenbar schnell erkannt; vor allem die Automobil- und Maschinenbauindustrie sowie verschiedene Anlagenbetreiber machen von ihm Gebrauch. Gerhard Heinz und sein Team analysierten bisher unter anderem die Berliner U-Bahn, elektrische Haushaltsgeräte, Flugzeugtriebwerke, einen Luxus-Sportwagen und Windkraftwerke.

EINLADUNG ZUM ABONNEMENT

Spektrum der Wissenschaft informiert monatlich über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

NUTZEN SIE DIE VORTEILE DES ABONNEMENTS:

Als Abonnent erhalten Sie Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis für monatlich DM 11,85 einschließlich Versand; Schüler und Studenten zahlen nur DM 10,30.

Das Postkartenbuch „Die kleine Astro-Galerie“ schenken wir Ihnen als Dank für Ihr Interesse.



Außerdem haben Sie als Abonnent freien Zugang zu unserem Online-Archiv. Dort liegen für Sie alle zurückliegenden Ausgaben von Spektrum der Wissenschaft seit 1993 im Volltext bereit.

BEGINNEN SIE IHR ABONNEMENT MIT DER NÄCHSTEN AUSGABE UND SENDEN SIE NEBENSTEHENDE BESTELLKARTE AN UNS AB.

WIR MÖCHTEN AUCH IHRE FREUNDE FÜR UNS GEWINNEN

Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft können Sie aus eigener Erfahrung am besten beurteilen, wie wichtig es ist, kompetent, umfassend und authentisch informiert zu sein. Es wird Ihnen daher sicher nicht schwer fallen, unter Ihren Freunden und Bekannten einen neuen Spektrum-Abonnenten zu finden.

Als Dank für Ihre Empfehlung erhalten Sie wahlweise eine der abgebildeten Prämien.

PICKNICK-RUCKSACK

Genießen Sie die ersten warmen Sonnenstrahlen bei einem Picknick zu zweit. Der praktische Rucksack enthält für zwei Personen Teller und Sektgläser aus Kunststoff sowie Besteck und Kellnermesser aus Edelstahl. Er ist mit einem Kühlfach und zwei Flaschenhaltern ausgestattet.





TOURING SET –

der ideale Begleiter für lange Autofahrten. Die Isolierflasche umfasst 0,9 Liter. Die beiden Becher (0,4 Liter) sind passend für Standard-Autohalterungen und haben einen fest schließenden Deckel mit Trinköffnung.

ES WAR 1 MAL

Socken haben den Hang, ihre Gegenstücke zu verlieren, und dies entspricht ganz sicher Murphys Gesetz. Dieses Buch stellt auf humorvolle Weise die verborgene mathematische Logik des Alltäglichen vor.

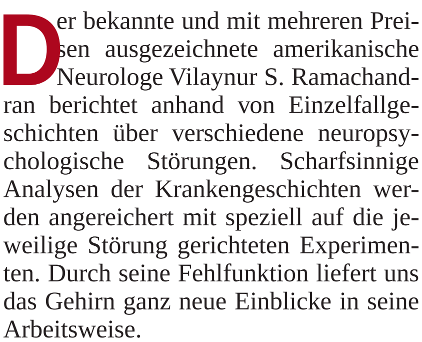
NEUROWISSENSCHAFTEN

Vilaynur S. Ramachandran und Sandra Blakeslee

Die blinde Frau, die sehen kann

Rätselhafte Phänomene unseres Bewusstseins

Aus dem Englischen von Hainer Kober.
Rowohlt, Reinbek 2001. 512 Seiten, DM 48,–



Der bekannte und mit mehreren Preisen ausgezeichnete amerikanische Neurologe Vilaynur S. Ramachandran berichtet anhand von Einzelfallgeschichten über verschiedene neuropsychologische Störungen. Scharfsinnige Analysen der Krankengeschichten werden angereichert mit speziell auf die jeweilige Störung gerichteten Experimenten. Durch seine Fehlfunktion liefert uns das Gehirn ganz neue Einblicke in seine Arbeitsweise.

Wie der amerikanische Originaltitel „Phantoms of the Brain“ verrät, geht es im Herzstück des Buches um Phantomempfindungen. Ein Mensch, dem ein Arm oder ein Bein amputiert wurde, spürt das entfernte Glied auch nach der Amputation. Dabei bleibt nicht nur die Hautempfindung erhalten, sondern auch die Empfindung, dass diese Gliedmaßen sich bewegen, bis hin zu andauernden quälenden Schmerzen. Dieses häufige Phänomen war in seiner Entstehung bislang ungeklärt.

Ramachandran bietet nun eine Erklärung an. Anscheinend liegen den Phantomerlebnissen so genannte Umkartierungen im Hirn zu Grunde. Das Gehirn repräsentiert den eigenen Körper in so genannten Karten, Gehirnbereichen, in denen für benachbarte Körperstellen benachbarte Neuronen zuständig sind. Das Umgekehrte muss nicht unbedingt gelten: Eng benachbarte Neuronen können weit entfernte Körperstellen repräsentieren (Spektrum der Wissenschaft 4/1996, S. 38). Nach der Amputation eines Körperteils werden die zugehörigen Nervenzellen nicht mehr genügend angesprochen. Daraufhin sprießen Nervenzell-Kontakte aus benachbarten Hirnregionen in dieses Gebiet ein. Auf diesem Wege empfangen beispielsweise die „arbeitslos“ gewordenen Neuronen für eine amputierte Hand Impulse aus der Wange. Andere Hirnteile jedoch, die aus dieser Region Informationen auslesen, interpretieren diese weiterhin als zur Hand gehörig; so kommt die Phantomempfindung zu Stande. Durch die Umkartierung ist eine virtuelle Realität entstanden, die nicht mit der tatsächlichen Realität übereinstimmt.

Zeichnung eines Neglect-Patienten: Seinem inneren Bild von der Welt fehlt die linke Hälfte.

Glücklicherweise kann man diese Fehlinterpretation des Gehirns überlisten, und zwar, indem man dem Gehirn eine andere, konkurrierende virtuelle Realität anbietet, etwa die Simulation eines funktionstüchtigen Gliedes. Dieser Therapieansatz ist neben der Erklärung des Phänomens ein weiteres Verdienst des Neurologen Ramachandran. Das Mittel zur Simulation ist verblüffend einfach: ein Spiegel! Der erzeugt eben ein Bild der anderen, gesunden Gliedmaße auf der Gegenseite.

Die visuelle Wahrnehmung einer funktionstüchtigen Gliedmaße auf der betroffenen Seite neutralisiert die ursprüngliche Information des Phantomgliedes und löst damit erfolgreich die alte Fehlwahrnehmung ab. Überraschenderweise kann das Gehirn dieses neue Angebot schnell akzeptieren, und die Wahrnehmung des Phantomgliedes verschwindet nach wenigen Spiegelübungen. Das zeigt, dass die Funktionsweise unseres Gehirns nicht statisch ist, sondern sich schnell an seine Umgebungsbedingungen anpasst. Diese Fähigkeit ist auch therapeutisch nutzbar. Das Buch stellt dazu noch zahlreiche weitere interessante Entdeckungen bereit.



Der linke Arm des Patienten ist vor zehn Jahren amputiert worden. Wenn gewisse Punkte auf dem Oberarm oder auf der Wange berührt werden (Zeichnung), löst das indirekte Empfindungen in der Phantomhand aus, und zwar unterscheidbar nach einzelnen Fingern.

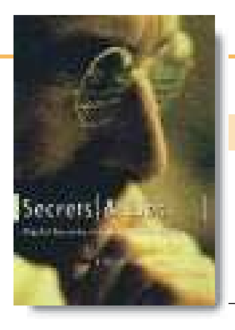
Ausführlich wird auf dieser Grundlage auch die spannende Frage diskutiert, wie das Gehirn eigentlich unser „Selbst“ erzeugt, also das Gefühl, dass ich eine einzigartige Person bin, die sich bestimmte Wahrnehmungen zuschreibt, auf Grund bestimmter Überzeugungen handelt und in der Zeit kontinuierlich existiert. Diese Frage wird in den letzten Jahren nicht mehr nur philosophisch, sondern zunehmend auch neurowissenschaftlich erörtert, zum Beispiel von Antonio Damasio (Spektrum der Wissenschaft 7/2000, S. 106). Ramachandran stellt zum Schluss des Buches dazu einen Katalog von Eigenschaften zur Diskussion, die unser Selbst ausmachen sollen. Dazu gehören unter anderem die Verkörperlichung, dass dieses Selbst also immer in einem Körper oder Organismus verankert ist, die Erinnerungsfähigkeit, welche die personale Identität über die Lebensspanne sicherstellt, die Fähigkeit, Erlebnisse mit bestimmten Gefühlen anzureichern, die uns später als Entscheidungshilfe dienen, die Handlungsfähigkeit dieses Selbst in der jeweils spezifischen Umweltsituation sowie die Einbindung des Selbst in einen sozialen Kontext. Dieser Katalog könnte in der nahen Zukunft durchaus eigene Forschungsprogramme initiieren.

Die weitaus größten Anteile des Buches bestehen aus den Beschreibungen und Analysen der Fallgeschichten, in denen Betroffene mit ihren einzigartigen Krankengeschichten immer im Vordergrund stehen. Trotz einer humorvollen Präsentation verliert Ramachandran nie den Patienten mit seiner Störung aus dem Auge; er begnügt sich nicht mit der Analyse, sondern schildert die Störung auch aus dem subjektiven Erleben des Betroffenen. Der Leser „spürt“ geradezu die Störung.

Ramachandran steht damit in der besten Tradition einer „romantischen Wissenschaft“, die Anfang des 20. Jahrhunderts von dem Neuropsychologen Alexander Luria begründet und besonders von Oliver Sacks weitergeführt wurde. Das Buch richtet sich damit an eine breite Leserschaft. Bezüge zu Alltagssituationen werden ebenso hergestellt wie zu philosophischen Konzepten des Leib-Seele-Problems. Das Buch bleibt dabei durchgängig sehr gut lesbar; das ist sicher auch der Wissenschaftsjournalistin Sandra Blakeslee zu verdanken, die das Buch mitverfasst hat.

Kai Vogeley

Der Rezensent ist Neurologe, Psychiater und Philosoph. Er arbeitet am Institut für Medizin des Forschungszentrums Jülich in enger Kooperation mit der Psychiatrischen Universitätsklinik Bonn.



COMPUTERSICHERHEIT

Bruce Schneier

Secrets and Lies

Digital Security in a Networked World

John Wiley & Sons, New York 2000. 431 Seiten, $ 29,99

Bruce Schneier ist ein begnadeter Kryptograph und erfolgreicher Sicherheitsberater. Er engagiert sich mit seiner Internet-Zeitschrift „Crypto-Gram“ schon lange für die Aufklärung der fachlichen und nichtfachlichen Öffentlichkeit über digitale Sicherheitsprobleme. Politisch steht er ein für globale Informationsfreiheit, absoluten Schutz der digitalen Privatsphäre, für öffentliche Infrastrukturen, die auf allgemein zugänglichen Programmtexten (*Open Source*) basieren, und für die finanzielle Haftbarkeit der Hersteller von fehlerhafter Software. Aus der Sicht europäischer Verbraucher eindeutig ein „good guy“.

Und nun beginnt er sein neuestes Buch mit einer Selbstanklage. Sein früheres Werk „Applied Cryptography“ basiere auf grundsätzlich falschen Einschätzungen dessen, was heute die Sicherheitsrealität in der Informations- und Kommunikationstechnologie (ICT) sei. Viele schlechte Systeme seien infolge dieses Buches in Betrieb.

Ja, und? In dieser Branche wälzen sich die technischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse ohnehin alle fünf Jahre komplett um – und das frühere Buch ist sieben Jahre alt. Öffentliche Selbstkritik ist zur Zeit in Mode, weil billig und medienwirksam. Schneier weist dann auch im Nachwort zart darauf hin, dass die Dienste seiner Firma „Counterpane Internet Security“ (www.counterpane.com) dem nunmehr von ihm vertretenen neuen Sicherheitsparadigma folgen.

Andererseits: Wenn sich dieser Experte schon einmal so fundamental geirrt hat, warum sollten wir jetzt seinem Rat vertrauen? Verlangt Schneier da etwas von uns, vor dem er uns im Buch warnt: blindes Vertrauen trotz schlechter Vorerfahrungen? Warum nicht besser eines der vielen spannenden Werke aus der Ecke „Cyberkrieg, E-Commerce und Handyviren-Hacker“ auf den Gabentisch legen?

Ich war anfangs sehr skeptisch; aber das Buch hat mich überzeugt. Es ist kein erfreuliches Buch, denn es klärt über drückende Probleme auf – sachlich und verständlich. Es verspricht keine Wunderlösungen. Es verlangt keine mathematischen oder technischen Vorkenntnisse, allein den gesunden Menschenverstand. Es ist ehrlich. Es stimmt.

Und es kommt etliche Jahre zu spät. Nur fällt das nicht groß auf, denn die öffentliche Diskussion und journalistische Abbildung von ICT-Sicherheitsproblemen in Europa hinkt viele Jahre hinter der technologischen Realität von Internet, Mobilfunk, E-Commerce, Verbraucherdaten-Schutz, Biometrie und Echelon her, ist von den Medien verzerrt und gelegentlich unsäglich dumm. Wenn Sie dieses Buch gelesen haben, wissen Sie genau, was ich meine.

Einige der Hauptsätze des Buches:

- Es gibt keine vollständige digitale Sicherheit; der übliche Spruch „Kryptographie plus Firewall löst alle Probleme“ ist Quacksalberei.
- Digitale Sicherheit funktioniert grundsätzlich anders als Sicherheit in der realen Welt. So kann ein Bösewicht einen Angriff leicht automatisieren, aus beliebiger Entfernung durchführen oder durch anonyme Veröffentlichung der nötigen Software andere dazu anstiften.
- Digitale Sicherheit ist kein Produkt, sondern ein Prozess in einem integrierten System aus ICT-Hard- und Software aller Art, Gebäuden, Infrastruktur, Menschen, Organisationsregeln, Gesetzen und so weiter.
- Die öffentliche, betriebliche und private Sicherheitslage wird mit zunehmender Komplexität der Technologie rapide schlechter.

Es gibt keine vollständige digitale Sicherheit

Das Buch ist fein strukturiert und mit großer Sorgfalt geschrieben. Man muss es der Reihe nach durchlesen; Überschlagen und Rosinenpicken funktioniert nicht, weil das umfangreiche Sachwissen, die vielen lehrreichen Insider-Anekdoten, die begründeten Wertungen und Ratschläge des Autors aufeinander aufbauen. Als Grundlage eines Kurses über Computersicherheit im Studienfach „e-business“ wäre es ohne weiteres geeignet.

Journalisten und andere Laien sollten das Lesen eher bedächtig angehen; die Informationen kommen dicht auf dicht und ohne viel erklärende Worte. ▶

Vieles muss der Leser selbst entdecken. Um vor schweren Sicherheitsproblemen bei Napster zu warnen, investiert Schneier genau einen Satz auf Seite 359, der aber nur verständlich ist, wenn man im Absatz „Buffer overflow“ (Seite 207) aufgepasst hat. Ob das den Bertelsmännern schon klar ist? Einige Microsoft-Produkte bekommen eher in Nebensätzen oder indirekt ihr Fett weg; die Rechtsabteilung des Verlags lässt grüßen.

Gleichen Sie Ihren Wissensstand mit dem eines echten Gurus ab!

Auch für Fachleute ist das Buch von großem Nutzen, trotz fast konsequenten Verzichts auf akademisches Beiwerk wie Formeln, Pseudocode und Diagramme. Ausnahme ist das Kapitel „Attack Trees“ mit einer mehrseitigen Auflistung aller Details der Bedrohung „Lesen einer verschlüsselten PGP-Nachricht“. Das Buch ist sehr aktuell (Stand Juni 2000), das Virus ILOVEYOU ist darin schon kommentiert. Und Bruce Schneier packt wirklich rückhaltlos aus. Gleichen Sie Ihren Wissensstand mit dem eines echten Gurus ab! Bei dem, was man schon weiß, lernt man zumindest noch, wie klar und einfach sich manches einem Politiker oder Manager erklären ließe, wäre er zum Zuhören bereit. Und warten Sie besser nicht auf eine deutsche Version; die Fachausdrücke sind kaum übersetzbar, und manches veraltet schnell.

Praktisch auf jeder Seite gibt es informative Zwischenüberschriften, und der zwölfseitige Index hat mich bisher nicht im Stich gelassen. Auf einer Seite im Anhang sind verlässliche Informationsquellen im Internet aufgelistet.

Wie gut trifft Bruce Schneier nun diesmal die Entwicklung, sagen wir für die nächsten vier Jahre? Keiner weiß das. Seine Klage über den allein Herstellerinteressen dienenden fortschreitenden Verlust von „Simplicity“ in der Softwaretechnologie ist sehr berechtigt; die Verbraucher haben da einen langen Emanzipationsprozess vor sich, und es ist leider noch nicht absehbar, wann ihnen der Geduldsfaden endlich reißt. Der Abschnitt „Fair Elections“ verblüfft sehr, weil er sich wie ein visionärer Kommentar zu den Auszählungsproblemen der jüngsten amerikanischen Präsidentenwahl liest.

Die desinteressierte Abhandlung des Abschnitts „Steganography“ erscheint dagegen bedenklich: Findet der Mathematiker Schneier hier keinen Bezug zu dem Thema, das mehr mit Semantik und künstlicher Intelligenz zu tun hat, oder will er erstmal ungestört seine Geschäfte betreiben? Auch das fundamentale Thema „Trust“ kommt nur im Kapitel „Conclusion“ und im Abschnitt „Trusted Third Parties“ kurz zur Sprache. Aber vielleicht lesen wir ja darüber im nächsten Buch – nach einer freundlichen Entschuldigung.

Hans-Werner Hein

Der Rezensent ist selbständiger IT-Sicherheitsberater in Köln. Zur Zeit koordiniert er das ICT-Curriculum der Open Universiteit Nederland in Heerlen.



CHEMIE

Hans-Jürgen Quadbeck-Seeger und Axel Fischer (Hg.)

Die Babywindel und 34 andere Chemiegeschichten

Wiley-VCH, Weinheim 2000. 291 Seiten, DM 48,–

Windeln und Waschmittel, Tesafilm und Tupperware haben Entdeckungsgeschichten, die oft ebenso spannend sind wie die Storys von den Dinosauriern und den Schwarzen Löchern, die den Markt der populärwissenschaftlichen Bücher dominieren. Nur sind diese Geschichten oft nur wenigen bekannt.

Der ehemalige Verlag Chemie, jetzt Wiley-VCH, bemüht sich, diese Lücke zu schließen, sowohl mit Übersetzungen englischer Werke wie „Chemie der Zukunft“ von Philip Ball und „Sonne, Sex und Schokolade“ von John Emsley als auch mit deutschen Originalberichten und Lesebüchern. Von letzterer Art ist das vorliegende Buch; es handelt sich um einen Wühltisch mit 35 „Chemiegeschichten“, die jeweils einen Aspekt der Chemie behandeln.

Neben produktorientierten Beiträgen über Klebstoffe, Beton, Waschmittel und die Babywindel des Buchtitels finden sich Berichte über Methoden, von der klassischen Chromatographie bis hin zur Polymerase-Kettenreaktion, sowie einige interessante Moleküle, die es noch nicht ganz bis in den Supermarkt geschafft haben, etwa die fußballförmigen Fullerene und die baumartig verzweigten Dendrimere.

Die Herausgeber haben gründlich redigiert, aber ihren 24 Koautoren auch viel Freiheit zugestanden (bis hin zur Wahl der Rechtschreibregeln), sodass die Beiträge stilistisch sehr unterschiedlich ausfallen. Die meisten enthalten eine Mischung aus allgemeinen Grundlagen und interessanten Details, von denen auch ältere Semester noch etwas lernen können. Von der beschreibbaren CD bis zum Fleckentferner wird die unsichtbare Magie vieler Alltagsprodukte in verständlicher Form erklärt. Manches ist auch geeignet, Eltern wissbegieriger Kinder das Leben zu erleichtern und der Frage: „Wie funktioniert das?“ den Schrecken zu nehmen.

Manche Kapitel lösen tatsächlich das Versprechen des Titels ein mit einer Geschichte, die sich zu erzählen lohnt – etwa wie Karl Ziegler die nach ihm benannten Katalysatoren entdeckte, mit denen man heute noch den Kunststoff Polyethylen herstellt. Von dieser Art hätte das Buch mehr vertragen können. Es gibt in der glorreichen Geschichte der deutschen Chemie vor 1933 Dutzende von Entde-



Otto Bayer, der Leiter des wissenschaftlichen Hauptlaboratoriums der I. G. Farben in Leverkusen, bestaunt 1941 seinen selbst aufgeschäumten Polyurethanpilz. Aus diesem Labor ging nach dem Zweiten Weltkrieg durch Entflechtung der I. G. Farben die Bayer AG hervor.



Der erste Schaumstoffkörper aus Styropor Anfang der fünfziger Jahre

ckern und Erfindern, deren Lebensgeschichten schon seit Jahrzehnten nicht mehr einem Laienpublikum erzählt wurden, obwohl ihre Erfindungen nach wie vor in Alltagsprodukten verwendet werden. Auch aus jüngster Zeit bringt das Buch spannende Geschichten von Zufallsentdeckungen und Konkurrenzkämpfen – man denke an die Fullerene.

Bei manchen Beiträgen ist hingegen keine Geschichte vorhanden, oder es gab keinen Geschichtenerzähler, der sie unter der Deckschicht der drögen Fakten ausgegraben hätte. In diesen Fällen wirken die Popularisierungsversuche bisweilen unbeholfen. Die inflationäre Verwendung von Anführungszeichen verrät, dass den Autoren bei der Verwendung bildlicher Ausdrucksweisen nicht ganz wohl ist. Mit entsprechender Kunstfertigkeit kann man auch eine vermeintlich trockene Episode der Wissenschaftsgeschichte an ein Millionenpublikum bringen; Dava Sobel hat da mit ihrem Buch „Längengrad“ Maßstäbe gesetzt. Doch leider scheint das Geschichtenerzählen den Chemikern schwerer zu fallen als Angehörigen anderer Fakultäten.

Alles in allem ist dieses Buch eine interessante Mischung mit Stärken und Schwächen, oder in den Worten einer seiner eigenen Überschriften (mit Original-Anführungszeichen): ein bunter „Chemiemix“. Geeignet vor allem für Studierende und andere Bildungshungrige, eher zum Stöbern als zum Durchlesen am Stück. Wenn ich es noch einmal lesen müsste, würde ich vielleicht mit Teil 2 (Polymere) anfangen. Das Imageproblem der Chemie in breiten Kreisen der Bevölkerung wird allerdings auch dieses Buch, so gut es gemeint ist, nicht beheben können.

Michael Groß

Der Rezensent ist Biochemiker und freiberuflicher Wissenschaftsjournalist in Oxford.

Versuchskarnickel gesucht!



Eines der zwölf Experimente, die zur Zeit im Web-Labor für Experimentelle Psychologie der Universität Zürich angeboten werden: http://www.psych.unizh.ch/genpsy/Ulf/Lab/WebExpPsyLabD.html

Wissenschaftler, die auf die Befragung und Untersuchung vieler Versuchspersonen angewiesen sind, vor allem Psychologen und Soziologen, suchen sich ihre Probanden zunehmend über das Internet. Gerade die Psychologie, die sich den Vorwurf gefallen lassen muss, dass ihre bevorzugten Versuchspersonen (weiße, untersemestrige Studentinnen und Studenten) die Bevölkerung nur ungenügend repräsentieren, hofft auf diesem Wege verschiedene ethnische und demografische Gruppen schnell und unkompliziert zu erreichen.

Das erste Experiment, an dem jeder Netzbenutzer teilnehmen konnte, wurde 1997 publiziert. Ein Jahr später waren auf der Homepage der American Psychological Society (http://psych.hanover.edu/APS/exponnet.html) bereits 35 aktuelle und für jedermann zugängliche Experimente aufgeführt. 1999 suchten über diese Website 65 Wissenschaftler Versuchspersonen, und Anfang Juli dieses Jahres hat man als potenzieller Proband die Auswahl unter weit über 100 Experimenten und Umfragen.

Viele der eigentlichen Web-Experimente sind grafisch ansprechend gestaltet, dauern nicht zu lange und machen Spaß: Der Experimentator muss sich schon Mühe geben, den Probanden bei der Stange zu halten, denn vorzeitig abzubrechen fällt dem nicht schwer. Zuweilen besteht der Lohn der Mühe auch in einer Auskunft über die eigene Person. Nach dem Ausfüllen eines Persönlichkeitsfragebogens erhielt ich die Antwort: „Sie haben charakterliche Schwächen, die Sie aber erfolgreich kaschieren können.“ Na ja – wenigstens das!

Die Tücken des virtuellen Labors

Das Web-Experiment stößt allerdings rasch an seine technischen Grenzen. Die Forscher müssen diverse Versuchsparameter ignorieren, die in Laborexperimenten normalerweise kontrolliert werden – Helligkeit des Bildschirms, Lautstärke des Tones und die räumliche Position der Lautsprecher, des Bildschirms und der Hand an der Computermaus. Das ist ein schweres Handicap, denn diese Variablen können die Resultate von Gedächtnis- und Wahrnehmungsexperimenten entscheidend beeinflussen. Man weiß noch sehr wenig über diese Zusammenhänge; deren Erforschung verspricht aber neue Einsichten in die Funktionsweise des menschlichen Gehirns. In dieser Hinsicht sind Web-Experimente der Forschung im Labor stets unterlegen.

Dem stehen als Vorteile gegenüber die Geschwindigkeit der Datenaufnahme, die Einsparung von Laborräumlichkeiten, die geringen Kosten und, als entscheidendes Argument, die große Anzahl an Probanden, welche die statistische Absicherung der Ergebnisse ungeheuer erleichtert. Kopfzerbrechen bereitet den Forschern lediglich, dass sie keinerlei Kontrolle über ihre Versuchspersonen haben. Tatsächlich müssen sie darauf vertrauen, dass die Versuchspersonen nicht betrügen und sich an die Anweisungen halten. Indem sie von ihren Probanden zunächst die Angabe der E-Mail-Adresse verlangen, sie einen Fragebogen zur Person ausfüllen lassen oder ähnliche Hürden errichten, versuchen sie zu erreichen, dass nur Surfer mit der richtigen Einstellung mitmachen.

Die Erfahrungen aus den ersten Jahren des Web-Experiments scheinen weitgehend positiv zu sein. Erste systematische Untersuchungen bestätigen die Reliabilität der neuen Methode: Web- und Laborexperimente liefern vergleichbare Resultate. Die Erwartung aber, dass die Teilnehmer nach Alter, Geschlecht und sozialer Schicht repräsentativ für die Bevölkerung seien, hat sich bis jetzt nicht erfüllt. Noch immer besteht der überwiegende Anteil der Versuchspersonen aus jungen weißen Männern. Mit der weiteren Verbreitung des Internets hoffen manche Wissenschaftler auf Besserung innerhalb der nächsten Jahre – ein Wunsch, der zumindest gegenwärtig etwas unrealistisch erscheint.

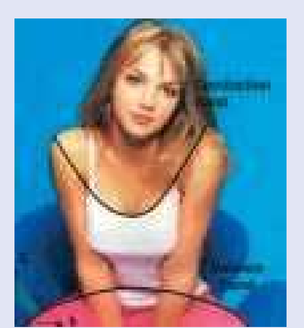
Daniel Bächtold

Der Autor ist promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist.

Britney Spears und die Halbleiterphysik



Offensichtlich hat die bekannte Popsängerin jede Menge Physik im Kopf; jedenfalls übernimmt niemand anders offiziell die Verantwortung für die sehr fachbezogenen und formelreichen Texte, die in http://britneyspears.ac/lasers.htm zu finden sind.



So weiß Britney Spears uns anschaulich zu illustrieren, dass die Energie E von Leitungs- und Valenzband in einem Halbleiter in guter Näherung durch parabelförmige Funktionen des Wellenzahlvektors k approximierbar ist. „In der Regel sind nur k-Werte nahe dem Minimum des Leitungsbandes und dem Maximum des Valenzbandes von Interesse.“

Wer Halbleiterphysik ohne Britney-Bilder genießen will (oder umgekehrt), wird auf der Website ebenfalls mit Links bedient.



Bumerangflüge

Mit den bescheidensten Mitteln kann man einen Rotationsflugkörper herstellen, der nach einer eleganten Schleife wieder in den Händen des Werfers landet.

VON WOLFGANG BÜRGER

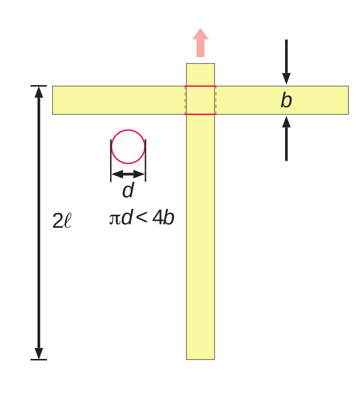
GRAFIK: AXEL WEIGEND

War einmal ein Bumerang;
war ein weniges zu lang.
Bumerang flog ein Stück,
aber kam nicht mehr zurück.
Publikum – noch stundenlang –
wartete auf Bumerang.

Joachim Ringelnatz

Traditionelle Bumerangs sind Flughölzer mit zwei Tragflächen, die einen mehr oder weniger stumpfen Winkel einschließen. Sie sind den weißen Besiedlern Australiens vor etwa vierhundert Jahren von der Urbevölkerung (den Aborigines) als technische Errungenschaft einer steinzeitlichen Gesellschaft überliefert worden. Die meisten sind schwere Jagdbumerangs („Kylies“); sie lassen sich mit aller Übung nicht so werfen, dass sie zum Startplatz zurückkommen. Dafür fliegen sie mehr als 100 Meter weit, falls sie nicht unterwegs ein Tier erlegen oder an einem anderen Hindernis stranden.

Sport- und Spielbumerangs haben etwas stärker abgewinkelte Tragflächen. Je nach Flächengewicht (das ist die Masse pro Flügelfläche) und aerodynamischer Qualität ihrer Tragflächen kehren sie in Rundflügen von etwa 10 bis 40 Metern Weite zuverlässig zum Werfer zurück, wenn sie nur mit etwas Geschick geworfen werden. Es gibt sie in unterschiedlichster Form und Größe.



Ein zweiflügeliger Bumerang ist zwar leicht aus einem Stück Holz zu schnitzen, aber seine Bewegung ist im Wortsinn verwickelt: Da sein Schwerpunkt in der Regel außerhalb des Holzes in der Kehle des Winkels liegt, umkreist er beim rotierenden Flug den Bumerang, und umgekehrt. Schwerpunktsbewegung und Rotation überlagern sich derart, dass die einzelnen Punkte des Holzes zykloidenartige wellen- oder schleifenförmige Kurven beschreiben. Felix Hess, der 1968 einen Aufsatz im „Scientific American“ und 1975 eine eindrucksvolle Dissertation über Bumerangs schrieb, machte die Flugbahnen vor dem Nachthimmel durch die Lichtspur einer kleinen batteriegespeisten Lampe sichtbar, die er in der Nähe einer Flügelspitze eingebaut hatte.

Der Einfachheit zuliebe ziehen wir es vor, ruhiger fliegende symmetrische Kreuz-Bumerangs mit dem Schwerpunkt im Zentrum zu studieren. Bei Aborigines findet man sie selten, was einleuchtet, da sie mit steinzeitlicher Technik schwer herzustellen sind. Im Science Museum von St. Paul (Minnesota) konnte ich Kreuzbumerangs aus Nordost-Australien bewundern, deren gekreuzte Flügel kunstvoll mit Lederschnüren zusammengeflochten waren.

Büro-Bumerangs: Zum Spielen und als Anschauungsobjekt stelle ich Ihnen einen kleinen Bumerang vor, der an Einfachheit nicht zu übertreffen ist, sicher zurückkehrt und für einen vollen Rundflug nicht mehr benötigt als einen Büroraum. Michael Siems, ein Deutscher Bumerangmeister, hat mir gezeigt, wie man ihn mit wenigen Handgriffen aus einem Paar Kartonstreifen herstellen kann. Bürokraten alter Schule führen so die Streifen, die beim Zurechtschneiden der Trennblätter für Aktenordner abfallen, einer nützlichen Verwendung zu. Nehmen Sie zwei Streifen Karton mit der Stärke 300 Gramm pro Quadratmeter, etwa von der Größe 21 cm × 2 cm. Verbinden Sie sie mit einem Haushalts-Gummiring (Durchmesser 1,5 cm) zu einem symmetrischen Kreuz. Da sich der Gummi nicht beliebig weit dehnen lässt, spannt man die Mitte des einen mit dem Ende des anderen Streifens zusammen und schiebt den zweiten Streifen erst dann in die Mitte durch. Eine sorgfältig gesetzte Heftklammer kann den Gummiring ersetzen. Damit der Bumerang später weiß, welche Kurve er fliegen soll, biegt man seine vier Flügel vor dem Abwurf leicht (kaum sichtbar) in die gewünschte Richtung.

Zum Start hält ein Rechtshänder das Flügelkreuz mit der rechten Hand vertikal oder ganz leicht nach rechts geneigt, die „hohle“ Seite nach links, und wirft den Bumerang nach vorne ab – oder leicht aufwärts. (Linkshänder müssen hier und im Folgenden rechts und links vertauschen.) Indem man die Bewegung der Hand kurz vor dem Loslassen abstoppt, erteilt man dem Bumerang viel Drehimpuls bei vergleichsweise wenig Vorwärtsimpuls. Schwere Bumerangs brauchen eine geringe Rechtsneigung, um von Anfang an von den Auftriebskräften ausreichend gehoben zu werden; für die leichten Karton-Vierflügler ist sie entbehrlich.

Felix Hess hat in seiner Dissertation treffend beschrieben, was dann geschieht: „Zuerst scheint der Bumerang geradewegs wegzufliegen, aber

THORSTEN KROME



Mehrere aufeinander gelegte und gemeinsam abgeworfene Büro-Bumerangs vollenden ihre Runde im Formationsflug – im Freien allerdings nur bei Windstille!

bald wendet er sich nach links und auch aufwärts und kehrt in weitem Bogen zum Werfer zurück. Irgendwo nahe beim Werfer kommt er zur Ruhe oder beschreibt noch eine zweite, kleinere Schleife, bevor er zu Boden sinkt. Stets legt sich die Flügelebene allmählich flach und liegt am Ende des Fluges fast horizontal.“ Die Flugbahn ist so gut reproduzierbar, dass zwei oder drei gleiche Bumerangs, die man aufeinander legt und gemeinsam startet, mit ihren fast identischen Abflugdaten die Runde fliegen wie eine Staffel Mini-Hubschrauber.

Rückkehr–Bumerangs: Eine physikalische Theorie des Bumerangfluges muss wenigstens drei Fragen beantworten: (1) Warum kommt der Bumerang zurück, und wie groß ist der Durchmesser seiner Rückkehrbahn? (2) Welcher Mechanismus bremst seinen Flug und bringt ihn sogar zur Ruhe? (3) Warum legt er sich stets flach?

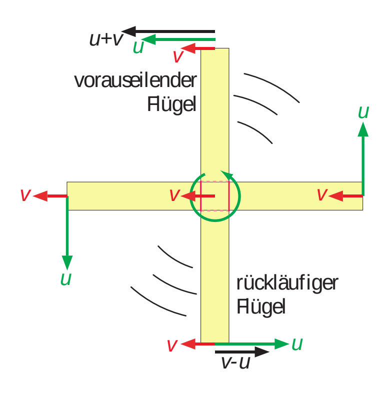
(1) Ein Bumerang ist sowohl ein Segelflieger als auch ein Kreisel. Seine Arme sind Flügel, die bei der Vorwärtsbewegung und der Drehung durch die Luft eine Kraft erfahren. Deren Komponente senkrecht zum Fahrtwind heißt „Auftrieb“, auch wenn sie in unserem Falle nicht nach oben gerichtet ist (Kasten Seite 98). Einen rechtshändig geworfenen Bumerang drängt der Auftrieb in die Linkskurve. Zugleich wirkt ein Drehmoment, das den Bumerang um die Achse seiner Flugrichtung kippen möchte; denn der vorauseilende Flügel erfährt einen stärkeren Fahrtwind und dementsprechend stärkeren Auftrieb als der rückläufige (Zeichnung rechts oben).

Diesem Drehmoment weicht er als Kreisel durch Drehung („Präzession“) seiner Flügelebene aus. Im Zusammenspiel von Bahnbewegung und Kreiselpräzession kehren Bumerangs zurück. Die Erfahrung lehrt, dass die Weite des Fluges kaum oder gar nicht von der Abwurfgeschwindigkeit abhängt, wohl aber die Geschwindigkeit des Fluges und die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich der Bumerang im Flug dreht.

(2) Segelflugzeuge und Papierflieger leisten ebenfalls Arbeit gegen den Luftwiderstand. Sie können aber im Gleitflug die potenzielle Energie der Schwerkraft in Bewegungsenergie umsetzen und daher so lange abwärts segeln, bis der Flug an einem Hindernis oder am Boden endet. Bumerangs verlieren dagegen einen Teil ihrer Bewegungsenergie unwiederbringlich durch Arbeit gegen den Luftwiderstand. Ihre Flüge enden daher nach begrenzter Dauer.

(3) Auf die Frage nach dem Grund des Flachlegens hat Hess trotz ernsthafter Bemühung keine schlüssige Antwort gefunden. Alle Bumerang-Amateure und die großen Bumerangmeister, die ihre Bumerangs bei der Rückkehr in horizontaler Lage, fast auf der Stelle drehend, zwischen den bloßen Händen auffangen, sind sich aber darin einig, dass die Flügelebene eines gut geworfenen Bumerangs sich stets auf die Horizontalebene einpendelt. Also muss die Schwerkraft die Ursache des Flachlegens sein. Anstatt in den Sinkflug überzugehen, legt sich der Bumerang flach und vergrößert damit den aufwärts gerichteten Anteil des Auftriebs seiner Flügel.

Kein Bumerang im „Spacelab“: Leider können wir die Schwerkraft auf der Erde nicht vorübergehend abschalten (oder zu unserem Glück? Beim schwerelosen Springen im Freien könnten wir leicht auf Nimmerwiedersehen im Weltraum verschwinden!). Aber wo die Schwerkraft un- ▶



Literaturhinweise

Boomerangs, Aerodynamics and Motion. Von Felix Hess. Proefschrift (Dissertation), Rijksuniversiteit te Groningen, 1975.

Classical Mechanics, a Modern Perspective. Von V. D. Barger und M. E. Olsson. McGraw-Hill, New York 1973, S. 171 (The Boomerang).

The Aerodynamics of Boomerangs. Von Felix Hess in: Scientific American, November 1968, S. 124.

Theorie des Bumerangflugs

Kreisel und Segelflieger zugleich

Ein in senkrechter Lage nach vorn abgeworfener Bumerang legt seine Flügelebene sofort nach dem Start schräg und fliegt eine Kurve, die annähernd in einer horizontalen Ebene liegt. Aus Beobachtungen von Hess leiten wir die Annahme her, dass die Ebene der Flügel stets tangential zur Flugbahn ist. (Man kann sich vorstellen, dass ein von dieser Orientierung abweichender Bumerang von den Luftwiderstandskräften alsbald in die „richtige" Lage gedrückt würde.) Die Auftriebskraft A der Flügel, die demnach senkrecht zur Flügelebene gerichtet ist, steht mit der Zentrifugalkraft $Z = mv^2/r$ und der Schwerkraft $G = mg$ im Gleichgewicht (m und v sind die Masse und die Schwerpunktsgeschwindigkeit des Bumerangs, r der örtliche Krümmungsradius seiner Bahn, α der Winkel der Normalenrichtung zur Flügelebene mit der Horizontalebene, g die Schwerebeschleunigung). Aus der Zeichnung entnimmt man je eine Gleichgewichtsbedingung für die Kräfte in vertikaler und in horizontaler Richtung: $G = A \sin\alpha$ und $Z = A \cos\alpha$.

Barger und Olsson haben in ihrem Lehrbuch als Übung zur Kreiselmechanik vorgerechnet, welche Auftriebskraft A ein Kreuzbumerang erfährt, wenn sein Schwerpunkt sich mit der Geschwindigkeit v innerhalb der Flügelebene fortbewegt und seine vier Flügel sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω in der Flügelebene drehen. Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass alle Teile der Flügel unabhängig voneinander zum Auftrieb des Bumerangs beitragen und ihre Beiträge proportional zum Quadrat der jeweiligen senkrechten Anströmgeschwindigkeit sind:

$$A = \frac{m}{L}\left(\frac{u^2}{3} + \frac{v^2}{2}\right)$$

Dabei ist $u = \omega\ell$ die Kreisbahngeschwindigkeit der Flügelspitzen und ℓ die Flügellänge. Der Parameter $L = 2Q/(\rho c_a)$, der die Dimension einer Länge hat, hängt außer von der Luftdichte ρ nur von Eigenschaften des Bumerangs ab: vom Auftriebsbeiwert c_a seiner Tragflächen und vom Flächengewicht $Q = m/(4b\ell)$, dem Verhältnis der Masse m zur Flügelfläche $4b\ell$ (für einen Vierflügler der Flügelbreite b). Für einen kleinen Büro-Bumerang von $m = 2{,}5$ Gramm mit $\ell = 10{,}5$ cm und $b = 2$ cm ist die Länge L ungefähr 1,2 Meter, wenn für c_a der Wert 0,5 angenommen wird.

Dem Drehmoment der Auftriebskräfte der Luft, das ihn um die Flugrichtung zu drehen sucht, weicht der Bumerang als Kreisel aus, indem er seine Flügelebene mit der Winkelgeschwindigkeit $\Omega = v/(L\cos\alpha)$ um die vertikale Achse durch seinen Schwerpunkt dreht: Er „präzediert". Aus der oben genannten Annahme (Flügelebene ist stets tangential zur Bahnkurve) folgt, dass die Bahnkurve eines Bumerangs der Drehung seiner Flügelebene folgt: $v = r\Omega$. Durch Elimination von Ω folgt aus den beiden letzten Gleichungen $r = L\cos\alpha$.

Der örtliche Bahnradius r hängt – anders als die Präzessionsgeschwindigkeit Ω – nicht von der Geschwindigkeit v des Bumerangs ab. Offensichtlich fliegen Bumerangs nicht weiter, wenn man sie heftiger abwirft, sondern nur schneller, und sie drehen sich schneller.

Der Luftwiderstand bremst die Rotation: u nimmt ab und damit auch der Auftrieb A. Da $G = A\sin\alpha$ konstant bleibt, muss α zunehmen: Der Bumerang legt sich flach. Wegen des Faktors L wächst r mit dem Flächengewicht des Bumerangs („schwerere Bumerangs fliegen weiter") und wird (wegen des Faktors $\cos\alpha$) umso kleiner, je flacher sich die Flügelebene gelegt hat.

Eliminiert man aus den obigen Gleichungen die Größen A, α und r, kann man im Rahmen dieser Bumerangtheorie

$$v^2 = 2gL\sqrt{\left(\frac{u^2}{3gL}\right)^2 - 1}$$

und damit alle anderen Größen (A, $\sin\alpha$ und so weiter) auf u zurückführen. Damit der Bumerang überhaupt fliegt, muss man ihn mit genügend großer Drehgeschwindigkeit $u_0 > \sqrt{3gL}$ starten. Die Gleichungen gelten, bis $u = \sqrt{3gL}$ und die Geschwindigkeit $v = 0$ geworden ist und der Bumerang, noch mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \sqrt{3gL}/\ell$ rotierend, die Mitte der Spiralbahn ($r = 0$) erreicht hat. Seine Flügelebene liegt dann horizontal ($\alpha = \pi/2$), und die Auftriebskraft kann gerade noch sein Gewicht tragen ($A = G$). Verkleinert sich u weiter, muss der Bumerang, ähnlich wie ein landender Hubschrauber, auf der Stelle niedergehen. Das ist für geschickte Bumerangwerfer die Gelegenheit, ihr Spielzeug mit den Händen aufzufangen.

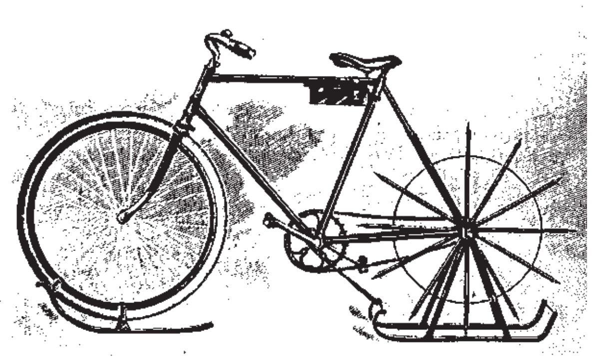
Während der Luftwiderstand die Drehgeschwindigkeit u des fliegenden Bumerangs bremst, wächst der dimensionslose Parameter $\tau = \sqrt{3gL}/u$. Er spielt die Rolle einer Zeit, die den Ablauf des Bumerangflugs ordnet (wenn auch nach einer immer langsamer laufenden Uhr). Der wirkliche Zeitablauf in Sekunden ergibt sich aus einer Differenzialgleichung für die Bremsung des Bumerangs durch den Luftwiderstand. Ohne die Gleichung zu lösen, kann man mit ihrer Hilfe die Flugdauer abschätzen. Sie hängt nur von den aerodynamischen Eigenschaften des Bumerangs ab; für den leichten Büro-Bumerang beträgt sie kaum zwei Sekunden. Sie wächst wie die Länge L mit dem Flächengewicht: Je schwerer der Bumerang, desto länger dauert sein Flug.

wirksam ist – in einem Raumschiff auf ballistischer Bahn – sollten sich Bumerangs nicht flachlegen. Beim Programm „Toys in Space" während des Discovery-Flugs 1984 hätten es die Astronauten im Orbit prüfen können. Sie führten in der Raumkapsel der staunenden Weltöffentlichkeit vor den Fernsehern zahlreiche physikalische Effektspielzeuge vor, darunter auch ein Papierflugzeug, das nicht recht wusste, was es im Weltraum sollte. Ein Büro-Bumerang, dessen Bahnkreis bequem in ihrem Raumschiff Platz gefunden hätte – das hätte der Hit werden können! ■



Radeln mit spitzen Speichen

Zu den verschiedenen Fahrradsystemen ist als neuestes das Schlittenfahrrad hinzugekommen, das unlängst von einer amerikanischen Gesellschaft eingeführt wurde. Am Vorderrad ist eine kleine Schlittenkufe angebracht, an der Achse des Hinterrades, welchem der Radkranz und die Gummireifen fehlen, stehen zwei Kufen. Das Hinterrad hat zwölf durch einen Stahlreifen verbundene Speichen mit scharfen Spitzen. Letztere dringen bei der Drehung des Rades in das Eis und vermitteln die Vorwärtsbewegung auf der glatten Fläche, während das Vorderrad nur dazu bestimmt ist, mittels der Lenkstange dem Fahrrade die Richtung zu erteilen. *(Das Neue Universum, 22. Jg., 1901, S. 378)*



Neuartiges Schlittenfahrrad

Harmlose Röntgenstrahlen

Ein Fortschritt ist auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen zu verzeichnen. Dem Mitgliede der Londoner Medizinischen Gesellschaft, Shenton, gelang es, mit Hilfe sehr grosser Vakuumröhren und starker Ströme Röntgenaufnahmen in Bruchteilen einer Sekunde zu machen. Ein Verbrennen der Haut und dergl. ist bei diesen kurzen Aufnahmen ausgeschlossen. Wertvoll erwiesen sich die starken Durchleuchtungen zur Erkennung von Nierensteinen, tief liegenden Brüchen u.s.w. Shenton ist im Besitz eines der größten Röntgenlaboratorien der Welt. *(Photographische Rundschau, 15. Jg., 1901, S. 187)*

Kalifornische Sonne heizt Dampfmaschine

In Südpasadena ist thatsächlich eine selbstthätige, von der Sonnenwärme getriebene Maschine aufgestellt worden. Der Motor, der einer großen Glasscheibe gleicht, ist ein aus 1800 Spiegeln zusammengesetzter Reflektor, der die Sonnenstrahlen in einem mittleren Brennpunkt vereinigt. Hier befindet sich ein Kessel, der 500 Liter Wasser fasst, während ein Dampfraum von 8 Kubikfuss vorhanden ist. Der Reflektor steht auf einem Gerüst, dessen Achse sich vermöge eines Uhrwerks genau mit der Sonne dreht. Etwa eine Stunde nach richtiger Einstellung des Kessels ist er weissglühend und das Manometer zeigt 150 Pfund Druck. Der Dampf wird zur Maschine geleitet. Diese pumpt Wasser aus einem Brunnen und hebt dabei in jeder Minute 6000 Liter Wasser. *(Häder's Zeitschrift für Maschinenbetrieb und Montage, 9. Jg., Nr. 17, 1901, S. 148)*

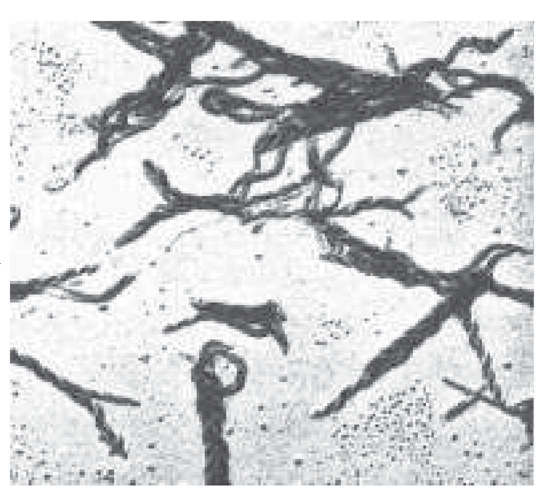


DFG gegründet

Die Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft ist in der Universität Köln am 1. und 2. August zusammengetreten, um den Jahresbericht für das Rechnungsjahr 1950 entgegenzunehmen und die Fusion mit dem „Deutschen Forschungsrat" zur „Deutschen Forschungsgemeinschaft" zu beschließen. Durch die Konstruktion der Forschungsgemeinschaft, die personelle Zusammensetzung ihrer Organe und die Übernahme des Gutachtersystems der Notgemeinschaft ist Gewähr dafür gegeben, daß die Forschungsmittel auf gleiche Weise wie bisher verteilt werden. *(Chemiker-Zeitung, 75. Jg., Nr. 24, 1951, S. 429)*

Zopfiger Virus

Jetzt erhielten wir mit einem besonders schonenden Verfahren elektronenmikroskopische Bilder des Kartoffel-X-Virus, die bisher nicht bekannte Formeigenschaften klar erkennen lassen. Sie zeigen eine gesetzmäßige Verschlingung der Fäden, und zwar finden wir in großer Zahl aus drei Fäden geflochtene Zöpfe, die teils in Aufsicht, teils in Seitenlage zu sehen sind. Sie können unseren Erachtens nur so zustandekommen, daß sich die freien, fortwachsenden Enden der Fäden umeinander schlingen; eine nachträgliche Verflechtung von Einzelfäden dürfte ausgeschlossen sein. *(Die Naturwissenschaften, Jg. 38, Heft 15, 1951, S. 355)*



Seltsame Virusgestalt unter dem Elektronenmikroskop

Hilfreiche Fluoreszenz der Tumoren

Nun berichtet Schütze, Heidelberg, auf dem Münchner Chirurgen-Kongreß 1951, daß auch das dem Fluoreszein sehr ähnliche Atebrin von Tumorgewebe gespeichert wird. Atebrin fluoresziert ebenso wie das Fluoreszein im ultravioletten Licht. Wenn man nun einem Tumor-Patienten vor der Operation Atebrin injiziert, so fluoresziert der Tumor nach operativer Freilegung bei UV-Bestrahlung. Dadurch ist es möglich, mit Sicherheit alles Tumorgewebe zu entfernen, da zurückgebliebene Reste fluoreszieren. Es wird mit dieser Methode aber auch vermieden, daß man aus Vorsicht zu viel reseziert. *(Umschau, 51. Jg., Heft 15, 1951, S. 474)*

Der Rettungsraumanzug

Beim Sommerurlaub auf der Internationalen Raumstation wird auch die Reisekleidung im Preis mit inbegriffen sein: Amerikanische Astronauten tragen während des Fluges leuchtend rotorange Rettungsanzüge. Das war früher anders. Nach vier erfolgreichen Testflügen des Spaceshuttles trug die Besatzung nur noch einfache, übrigens blaue, Overalls und je eine Sauerstoffmaske. Da die Mannschaftskabine unter Druck stand, schienen sperrige Druckanzüge entbehrlich. Spezielle Rettungseinrichtungen waren ebenfalls nicht vorgesehen; im Notfall sollte das Raumschiff auf der nächstmöglichen Landebahn aufsetzen.

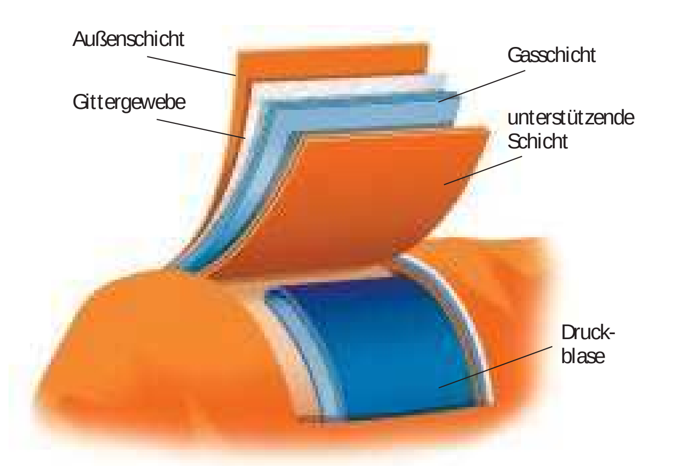
Für die Flüge 5 bis 24 reichte dieser minimalistische Ansatz aus. Doch die Explosion der *Challenger* 1986 schockte und ernüchterte. Seitdem schützt wieder ein Druckanzug bei Feuer, Eintauchen in kaltes Wasser und plötzlichem Druckverlust in der Kabine – der Anzug lässt je nach Außendruck automatisch Luft ein oder ab – bei Start und Wiedereintritt in die Erdatmosphäre. Die rotorange Signalfarbe zählt ebenso wie die integrierten Fallschirme, das Rettungsfloß, die Leuchtpistolen und die sonstige Ausstattung zu den Sicherheitsmerkmalen des Anzugs: Sie soll es den Suchtrupps erleichtern, die Astronauten im Ozean zu entdecken.

Hergestellt werden die Anzüge von der David Clark Company in Worcester (US-Bundesstaat Massachusetts). Bisher musste sich die Rettungsausrüstung zwar noch bei keiner Mission beweisen, doch unterzieht die amerikanische Marine, die die Fallschirme liefert, die Anzüge alle zwei Jahre ausgiebigen Falltests.

Die Autorin **Sarah Simpson** *ist Mitarbeiterin von Scientific American.*

Wenn eine Landung unmöglich ist, ermöglichen spezielle Vorrichtungen den Absprung. Im Idealfall gleichen die Astronauten zuvor den Kabinendruck an den Außendruck an und lösen dann ihre Bauchgurte in einer Höhe von 12 000 Metern. Ein Crewmitglied öffnet bei 9000 Metern die Notausstiegsluke und die Astronauten klinken sich mit speziellen Karabinern an einem etwa 2,5 Meter langen Teleskoparm ein. Während einer nach dem anderen aus dem Shuttle gleitet, bringen die auf den Karabiner einwirkenden Kräfte das Öffnen des Fallschirms in Gang. Sobald dessen Hauptkappe austritt, wird ein SARSAT-Funkfeuer aktiviert, bei der Wasserung dann der Schirm automatisch ausgeklinkt. Der Wasserungsort kann schließlich mit grüner Seefarbe markiert werden.





Das Grundmaterial des Rettungsanzugs besteht zum einen aus atmungsaktivem Gore-Tex, das die unter Druck stehende Luft im Anzug hält und zugleich Wasserdampf entweichen lässt. Zum anderen verleiht Nomex, ein spezielles Gewebe aus Aramid-Fasern, Brandschutz und Abriebfestigkeit. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre tragen die Astronauten außerdem einen elastischen Anzug, der die Beine unterstützt, um Blutstauungen zu vermeiden.

Der Fallschirmsack bildet im Shuttle eine Sitzlehne. Bei der Wasserung blasen sich Schwimmweste und Rettungsfloß selbsttätig auf, um auch einen bewusstlosen Astronauten zu schützen.

Kommunikationsvorrichtung

Schwimmweste

Lendenstütze

Trinkwasserreserve

Hilfsfallschirm

Bremsschirm

Hauptfallschirmkappe

Sauerstoffflasche

Rettungsfloß

grüner Auslöseknopf für das Sauerstoffgerät

Übrigens...

➤ wurden vor der Erfindung des Teleskopstabs bevorzugt Zugpropellerraketen für den Notabsprung verwendet. Der Astronaut legte sich flach auf den Rücken und befestigte eine an seinem Anzug befindliche Abzugsleine an einer Rakete. Wenn die Rakete durch die Notausstiegsluke schoss, riss sie den Astronauten mit nach draußen – mit dem Zwölffachen der Schwerkraft.

➤ üben Besatzungen den Notabsprung auch in mit Körnern gefüllten Anzügen. Das simuliert die Kraftlosigkeit eines Astronauten, der lange schwerelos in einer Raumstation gelebt hat.

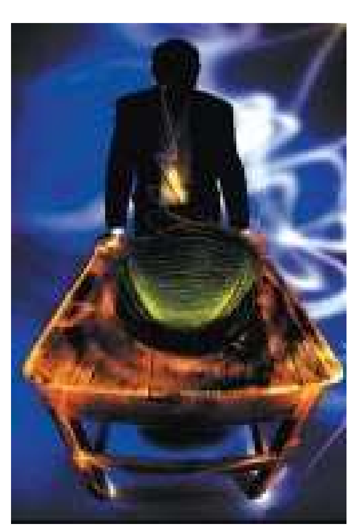
➤ waren die ersten Rettungsanzüge viel dicker und sperriger als heutige Modelle, denn statt Gore-Tex verwandten die Ingenieure urethanbeschichtetes Nylon.





Die Heizung der Sonnenkorona

Wärme strömt vom heißeren Körper zum kälteren, und nicht etwa umgekehrt. So wird eine lauwarme Herdplatte niemals Wasser zum Kochen bringen. Wie aber schafft es die Sonne mit ihrer vergleichsweise kalten Oberfläche, ihre äußere Atmosphäre auf mehrere Millionen Grad zu erhitzen?



Gefrorenes Licht

In ausgeklügelten Experimenten gelingt es, Licht fast auf Schritttempo abzubremsen. Der sensationelle Effekt eröffnet neue Wege in der optischen Datenübertragung, ungeahnt präzises Vermessen einzelner Atome und sogar die Chance, winzige Schwarze Löcher im Labor zu schaffen.



Wie Fliegen fliegen

Insekten erzeugen ihren Auftrieb durch eine raffinierte aerodynamische Technik. Biophysiker versuchen jetzt, eine Roboterfliege zu bauen.



Mit Chemie gegen Antibiotikaresistenz

Bakterien wappnen sich zunehmend gegen herkömmliche Antibiotika. Doch der Mensch kann die Krankheitserreger seinerseits austricksen. Er muss nur ihre Waffen kennen und ausschalten.

Weitere Themen im September

Das Selbstbild von Gewalttätern

Gewalttäter leiden nicht unter mangelndem Selbstbewusstsein – im Gegenteil! Einer neuen Studie zufolge fühlen sie sich aber besonders leicht angegriffen.

Brennstoffzelle mit Tücken

Die Membranen vieler Brennstoffzellen sind im Grunde Polymerschwämme, die feinen Poren gefüllt mit Wasser. Auf dem feuchten Element basiert ihre Leitfähigkeit, daher rühren aber auch allerlei Schwächen. Auf der Suche nach dem besseren Wirkungsgrad sind deshalb alternative Konzepte gefragt.